

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



Radek Plechač

**ROZVRHOVÁNÍ DÍLENSKÝCH ZAKÁZEK S PODPOROU
POČÍTAČOVÉ SIMULACE**

Diplomová práce

2009

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Studijní program: M 2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T030 – Výrobní systémy

Zaměření: Pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu

ROZVRHOVÁNÍ DÍLENSKÝCH ZAKÁZEK S PODPOROU POČÍTAČOVÉ SIMULACE

JOB SHOP SCHEDULING WITH THE AID OF THE COMPUTER SIMULATION

KVS-VS-193

Radek Plechač

Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. František Manlig
Konzultant: Ing. František Koblasa

Počet stran : 63
Počet příloh : 4
Počet obrázků : 12
Počet tabulek : 39

V Liberci 28. 5. 2009

Zadání diplomové práce

Diplomová práce KVS-VS-193

**TÉMA: ROZVRHOVÁNÍ DÍLENSKÝCH ZAKÁZEK S PODPOROU
POČÍTAČOVÉ SIMULACE**

ANOTACE: Tato práce se zabývá problematikou řízení a rozvrhování zakázek na úrovni dílenského mistra a hodnotí možnost využití počítačové simulace v tomto prostředí. Práce obsahuje porovnání vhodnosti použití optimalizačních algoritmů s prioritními pravidly, poukazuje na výhody a nevýhody spojené s využitím optimalizačních algoritmů při rozvrhování výroby a představuje problémy plynoucí z nevhodné volby účelové funkce. K řešení optimalizačních problémů je v této práci využit simulační systém Simcron MODELLER.

**THEME: JOB SHOP SCHEDULING WITH THE AID OF THE COMPUTER
SIMULATION**

ANNOTATION: This work deals with the job shop scheduling at the level of foreman with the aid of the computer simulation. The work includes comparison of optimization algorithms and priority rules usability, points to the advantages and disadvantages of optimization algorithms for job shop scheduling and presents problems arising from inappropriate choice of objective function. The Simcron MODELLER simulation system is used to solve optimization problems in this work.

Klíčová slova: simulace, optimalizace, rozvrhování, optimalizační metody
Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů
Dokončeno: 2009
Archivní označení zprávy:

Počet stran : 63
Počet příloh : 4
Počet obrázků : 12
Počet tabulek : 39

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Datum:

Podpis

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Liberci 28. 5. 2009

.....

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Doc. Dr. Ing. Františku Manligovi za odborné vedení a konzultace, které mi pomohly při psaní této práce.

Také bych chtěl poděkovat Ing. Františku Koblasovi za poskytnutí materiálů, ze kterých jsem mohl čerpat potřebné informace.

Obsah

Seznam použitých zkratek	9
1 Úvod	10
1.1 Úvod do problematiky.....	10
1.2 Cíle diplomové práce	11
2 Dílenské řízení výroby	12
2.1 Systémy pro dílenské řízení výroby	12
2.1.1 MRP II	12
2.1.2 MRP III	13
2.1.3 OPT	13
2.1.4 APS	14
2.1.5 Řízení výroby s využitím počítačové simulace	14
2.2 Rozvrhování výrobních operací	15
2.2.1 Open Shop.....	16
2.2.2 Flow Shop.....	17
2.2.3 Job Shop.....	17
2.3 Druhy rozvrhů	18
2.3.1 Semiaktivní rozvrh.....	19
2.3.2 Aktivní rozvrh.....	20
2.3.3 Rozvrh bez zpoždění.....	21
3 Optimalizační algoritmy.....	22
3.1 Rozdělení optimalizačních algoritmů	22
3.2 Princip činnosti použitých optimalizačních algoritmů.....	24
3.2.1 Metoda náhodného prohledávání (Blind search – BS)	24
3.2.2 Metoda hladového prohledávání (Greedy search – GS).....	24
3.2.3 Metoda simulovaného žíhání (Simulated Annealing – SA)	25
3.2.4 Metoda zakázaného prohledávání (Tabu search – TS).....	25
3.2.5 Genetický algoritmus (Genetic algorithm – GA)	26
4 Simcron MODELLER.....	27
4.1 Optimalizační algoritmy.....	27
4.2 Prioritní pravidla	28

4.3	Účelové funkce.....	30
5	Teoretické modely výroby	32
5.1	Optimalizace pomocí optimalizačních algoritmů	32
5.1.1	Zadání teoretických modelů.....	33
5.1.2	Optimalizace teoretických modelů s využitím rozvrhu bez zpoždění	34
5.1.3	Optimalizace teoretických modelů s využitím aktivního rozvrhu	38
5.2	Zhodnocení dosažených výsledků.....	42
6	Model lisovny.....	45
6.1	Řízení zakázek pomocí prioritních pravidel	45
6.1.1	Naměřené hodnoty	45
6.1.2	Zhodnocení dosažených výsledků	47
6.2	Optimalizace pomocí optimalizačních algoritmů – část 1.	47
6.2.1	Naměřené hodnoty	48
6.2.2	Zhodnocení dosažených výsledků	49
6.3	Optimalizace pomocí optimalizačních algoritmů – část 2.	51
6.3.1	Naměřené hodnoty	51
6.3.2	Zhodnocení dosažených výsledků	55
7	Zhodnocení využitelnosti optimalizačních metod.....	56
8	Závěr	58
	Použitá literatura	59
	Seznam obrázků a tabulek.....	62
	Seznam příloh.....	63

Seznam použitých zkratk

APS	Advanced planning and scheduling (pokročilé plánování a rozvrhování)
BS	Blind search (metoda náhodného prohledávání)
ERP	Enterprise resource planning (plánování celopodnikových zdrojů)
GA	Genethic algorithm (genetický algoritmus)
GS	Greedy search (metoda hladového prohledávání)
IS	Informační systém
JIT	Just in Time (= právě včas)
MRP	Material Requirements Planning (plánování materiálových požadavků)
MRP II	Manufacturing Resource Planning (plánování výrobních zdrojů)
OPT	Optimized Production Technology (řízení úzkých míst)
SA	Simulated annealing (metoda simulovaného žíhání)
TS	Tabu search (metoda zakázaného prohledávání)

1 Úvod

1.1 Úvod do problematiky

V dnešní době se výrobní firmy stále více zaměřují na přání a potřeby svých zákazníků. Musí proto rychle, pružně a hlavně efektivně reagovat na jejich požadavky, což klade zvýšené nároky na tvorbu výrobního plánu. Důležitou oblastí se tak stává operativní řízení výroby. [2], [20], [21]

V rámci operativního řízení se rozepisují výrobní úkoly na jednotlivá pracoviště. Zároveň je důležité určit termín zahájení výroby tak, aby byly splněny dodací lhůty (přání zákazníka). Jakmile nastane jakákoliv změna (porucha stroje, změna požadavku zákazníka), je nutné okamžitě reagovat a patřičně upravit výrobní plán. Výsledkem je výrobek dodaný zákazníkovi v termínu ve správném množství a kvalitě. [22]

Snaha o rozplánování jednotlivých úkolů na aktuálně dostupná pracoviště vedla k využití systémů dílenského plánování a řízení výroby. Tyto systémy přebírají výrobní zakázky od systémů ERP a umožňují jejich rozplánování do dostupných kapacit. Zároveň zajišťují zpětnou vazbu na systém ERP. V této oblasti pozorujeme následující vývojové tendence [2]:

- Systémy ERP obsahující vlastní modul „Dílenské řízení“
- Systémy APS využívající speciální plánovací algoritmy
- Menší systémy podporující rozhodování mistra pomocí grafických plánovacích tabulí ve formě Ganttova diagramu

V oblasti rozvrhování výroby i vlastního dílenského řízení je stále skryt velký potenciál pro zlepšování, např. plánování do omezených kapacit, určení vhodné sekvence výrobních operací pro co nejlepší využití dostupných kapacit, rychlá reakce na aktuální změny v dílně (např. porucha stroje či nemoc pracovníka) apod.

Diplomová práce se zabývá naznačenou problematikou plánování a řízení výrobních pracovišť a zdrojů na úrovni dílenského řízení. Pozornost věnuje možnostem využití počítačové simulace a optimalizačních algoritmů k efektivnějšímu využití dostupných kapacit i k zefektivnění práce dílenských plánovačů.

1.2 Cíle diplomové práce

Cílem této diplomové práce je zhodnotit možnosti využití počítačové simulace při dílenském řízení výroby. K tomu je třeba posoudit efektivnost optimalizačních algoritmů, porovnat tyto algoritmy s prioritními pravidly a odhalit problémy související s použitím optimalizačních algoritmů.

V teoretické části práce jsou tak představeny současné možnosti dílenského řízení výroby a popsány optimalizační algoritmy používané při počítačové simulaci. V kapitole „Simcron MODELLER“ jsou uvedeny parametry optimalizačních algoritmů nastavené při optimalizaci, jsou zde popsána prioritní pravidla a vysvětleno je zde použití účelových funkcí. V praktické části jsou nejprve na teoretických modelech výroby vyzkoušeny optimalizační algoritmy a výsledky jsou porovnány s výsledky jednoho z nejpoužívanějších prioritních pravidel. V další kapitole praktické části je model lisovny nejprve řízen prioritními pravidly systému Simcron a poté je optimalizován pomocí optimalizačních algoritmů. Poznatky získané během všech měření jsou shrnuty v závěrečném zhodnocení.

2 Dílenské řízení výroby

Řízení výroby na úrovni dílenského mistra navazuje na plánovací aktivity v systémech řízení a plánování výroby. Zakázky naplánované v těchto systémech musí být v dílenském řízení realizovatelné. Dílenské řízení výroby řeší vztah mezi požadavky, termíny, zdroji a množstvím v krátkodobém časovém horizontu, což klade vysoké požadavky na rychlost hledání řešení a pružnost řízení s ohledem na měnící se situaci ve výrobě. [4], [10]

2.1 Systémy pro dílenské řízení výroby

Podle [4] můžeme systémy pro dílenské řízení výroby dělit do dvou skupin. Tlakový systém (Push), je takový systém, ve kterém je výroba řízena pevným plánem a vysokou prioritou zde mají podnikové cíle (např. maximalizace využití podnikových zdrojů). V tahovém systému (Pull) je začátek zpracování nového výrobku podmíněn ukončením práce na předchozím výrobku a vysokou prioritou zde mají tržní cíle (např. pružné dodávky výrobků na trh).

V současné době se využívá celá řada systémů pro plánování a řízení výroby. Mezi nejčastěji používané patří [8]:

1. MRP II – Manufacturing Resource Planning (Plánování výrobních zdrojů)
2. MRP III – Synchro MRP II
3. OPT – Optimized Production Technology (Řízení úzkých míst)
4. APS – Advanced planning and scheduling (Pokročilé plánování a rozvrhování)

2.1.1 MRP II

Systém MRP II vznikl rozšířením funkcí systému pro plánování materiálových požadavků (MRP). Jde o tlakový systém, jehož nejvhodnější využití najdeme v oblasti kusové a malo až středně sériové výroby.

Nevýhodou systémů MRP II je plánování na jednotlivých úrovních do neomezených kapacit. Až po naplánování se kontroluje, zdali jsou dostupné kapacity pro splnění

plánu. Pokud požadavky na kapacitu zdrojů převyšují aktuální dostupnou kapacitu, je nutné tento problém řešit (např. rozšířením kapacit, přeplánováním požadavku na méně vytížený termín nebo změnou původního plánu). Až po vyvážení požadavků na kapacity s aktuální kapacitou je možné určit velikost výrobních objednávek a prioritní pravidla pro řízení. [4], [18]

Výstupem ze systému bývá fronta operací pro aktuální a následující plánovací období. [8]

2.1.2 MRP III

Jde o tahový systém, který vznikl kombinací zásad JIT a systému MRP II. Také tento systém plánuje do neomezených kapacit. [29]

Výstupem ze systému bývá fronta operací pro aktuální plánovací období. [8]

2.1.3 OPT

Princip činnosti systému OPT spočívá v analýze a optimalizaci úzkých míst v systému. Úzká místa mají výrazný vliv na průběh výroby, a proto může být optimálním využitím úzkých kapacit docíleno zlepšení průměrného využití pracovišť. [4]

Systém OPT lze shrnout do devíti pravidel [10]:

1. Vyvažuje se tok výrobků a nikoliv kapacita
2. Kapacitní možnosti úzkých míst systému udávají úroveň využití systému
3. Snaha o maximální využití kapacit „neúzkých“ pracovišť není vždy přínosem pro maximální využití celého systému
4. Hodina ztráty na „úzkém“ pracovišti je hodinou ztráty celého systému
5. Hodina ušetřená na pracovišti, které není úzkým místem, nemá s ohledem na celý systém význam
6. Úzká místa ovlivňují jak průběžnou dobu výroby, tak i výši zásob
7. Velikost výrobní dávky se nerovná velikosti transportní dávky
8. Výrobní dávka by neměla být fixní, ale proměnlivá
9. Po sestavení plánů je nutné všechny předpoklady současně přezkoumat

Systém nejprve zjistí potřebné informace (informace o objednávkách, předpovědi poptávky, kusovníky apod.), poté identifikuje úzká místa, dále rozčlení pracoviště na běžná a úzká a nakonec navrhne rozvrh pro úzká místa. Zároveň jsou tvořeny rozvrhy pro běžná pracoviště tak, aby se tato nestala úzkými místy. [10]

Výstupem ze systému bývá rozvrh pro úzká místa a místa předcházející vzhledem k technologickému postupu zakázek. [8]

2.1.4 APS

Systém APS je systém, který dokáže plánovat do omezených kapacit. Je založen na principu, podle kterého jsou výrobní kapacity a vstupní materiál optimálně využity pro potřeby zákazníka. Systémy APS tak současně plánují jak požadavky na materiál, tak i požadavky na výrobní kapacitu. Nejčastěji najdou uplatnění v prostředích splňujících následující podmínky [25]:

- Výroba na zakázku
- Široký sortiment výrobků
- Výrobky se složitými kusovníky a technologickými postupy
- Častá změna výrobního plánu z důvodu nepředvídatelných změn

Výhodou těchto systémů je využití optimalizačních metod pro tvorbu výrobního plánu s ohledem na aktuální stav priorit.

Výstupem ze systému bývá rozvrh prací pro všechna pracoviště. [8]

2.1.5 Řízení výroby s využitím počítačové simulace

Mocným nástrojem pro vyzkoušení různých variant nebo metod řízení je počítačová simulace. Dílenští plánovači mohou relativně snadno sledovat „co se stane, když...“ a tím odhadnout budoucí chování systému. Mají tak možnost porovnávat jednotlivé scénáře výroby, hledat a odkrývat další rezervy ve výrobě a naleznout tak optimální řešení řešeného problému. [2], [22]

Do simulačního modelu lze zahrnout mnoho omezení (např. rozpracované zakázky, omezení počtu pracovníků, požadavky na seřizování, stochastické vlivy apod.), což řada systémů ERP neumožňuje. Výsledkem je tak mnoho důležitých a kvalitních informací o analyzovaném procesu (např. údaje o vytížení jednotlivých pracovišť, Ganttův diagram rozvržených dílenských zakázek apod.), jejichž analýzou lze získat např. detailní přehled o stavu zakázek, rozpis práce pro jednotlivé pracovníky, termíny seřizování strojů apod. Velikou výhodou řízení výroby pomocí počítačové simulace je plánování do omezených kapacit. Plánovač tak může při výskytu nečekané události (např. porucha stroje, nemoc pracovníka apod.) relativně snadno a rychle přeplánovat výrobu podle aktuální situace. [2]

2.2 Rozvrhování výrobních operací

Rozvrhování výrobních operací se zabývá přiřazováním jednotlivých operací k pracovištím a tvorbou pořadí, ve kterém mají být operace prováděny. Mezi hlavní cíle patří [13]:

- Zajištění včasných dodávek
- Minimalizace průběžných časů výroby
- Maximalizace využití pracovišť
- Minimalizace zásob a rozpracovanosti

Mezi uvedenými cíly ovšem existuje konflikt (např. maximální využití pracovišť vede k vysokým výrobním dávkám a zásobám). Proto je třeba stanovit takový vzájemný vztah mezi operacemi (rozvrh), který zajišťuje co možná neoptimálnější fungování celého systému. [4], [5], [6], [10]

Úlohy rozvrhování jsou kombinatorickými problémy a počet možných řešení je konečný. Klasické metody pro řešení kombinatorických problémů (např. dynamické programování nebo metoda větví a mezí) dokážou poskytnout optimální řešení, ovšem u rozsáhlých problémů není možné tyto metody v reálném čase využít. [12] Tyto problémy je nutné řešit pomocí optimalizačních algoritmů, které jsou popsány ve třetí kapitole této práce.

Základní pojmy používané při rozvrhování výrobních operací [12]:

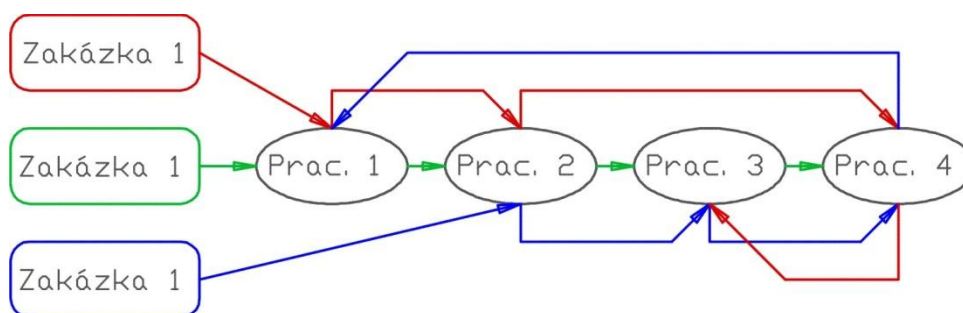
- Operace – základní technologický úkon, který nelze dále rozdělit na více technologických úkonů
- Zakázka – skládá se z operací, které je nutné vykonat k dokončení zakázky
- Pracoviště – místo, kde je možné vykonávat operace

Při rozvrhování výrobních operací se rozlišují tři základní rozhodovací problémy [8], [11], [17]:

1. Otevřený problém (Open shop)
2. Sekvenční problém (Flow shop)
3. Rozvrhovací problém (Job shop)

2.2.1 Open Shop

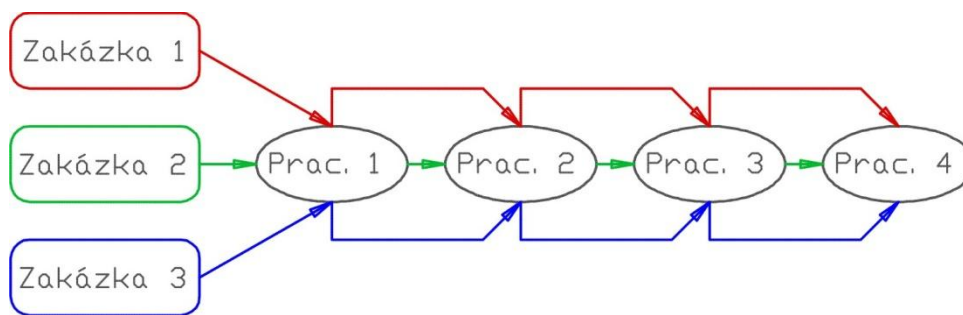
- Každá zakázka se skládá z tolika operací, kolik je pracovišť
- Každá operace se provádí na jiném pracovišti
- Pořadí, v jakém jsou operace prováděny na jednotlivých pracovištích, je libovolné
- Na každém pracovišti může být v jednom okamžiku vykonávána pouze jedna operace jedné zakázky
- Příklad problému typu open shop: záruční prohlídka auta



Obr. 2.1: Model výroby typu Open shop

2.2.2 Flow Shop

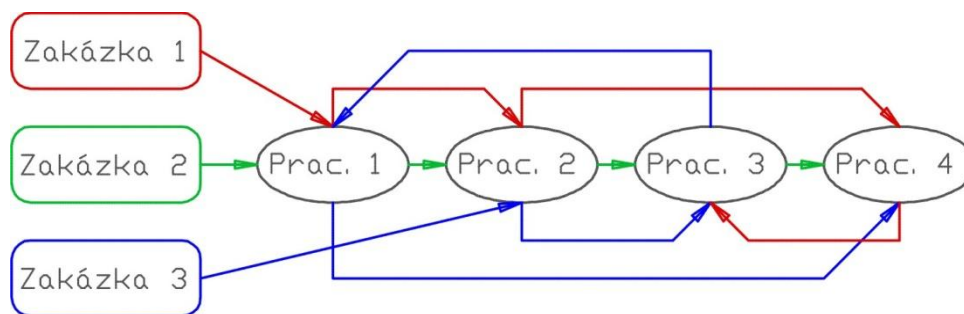
- Každá zakázka se skládá z tolika operací, kolik je pracovišť
- Každá operace se provádí na jiném pracovišti
- Pořadí, v jakém jsou operace prováděny na jednotlivých pracovištích, je pevně dané
- Toto pořadí je pro všechny zakázky stejné
- Na každém pracovišti může být v jednom okamžiku vykonávána pouze jedna operace jedné zakázky
- Příklad problému typu flow shop: pásová výroba



Obr. 2.2: Model výroby typu Flow shop

2.2.3 Job Shop

- Každá zakázka se obecně skládá z nestejného počtu operací
- Pro provedení každé operace je zapotřebí jednoznačně přidělené pracoviště
- Pořadí, v jakém jsou operace prováděny na jednotlivých pracovištích, je specifikováno technologií
- Na každém pracovišti může být v jednom okamžiku vykonávána pouze jedna operace jedné zakázky
- Příklad problému typu job shop: kusová výroba na zakázku



Obr. 2.3: Model výroby typu Job shop

2.3 Druhy rozvrhů

Rozvrh je dán rozmístěním operací v čase na jednotlivých pracovištích. Optimální rozvrh je takový, ve kterém je rozmístění operací optimální vzhledem k zadanému optimalizačnímu kritériu (např. čas dokončení všech zakázek – tzv. makespan). [17] Ke grafickému znázornění rozvrhu se používá Ganttův diagram, který ukazuje naplánované posloupnosti operací v čase na jednotlivých pracovištích.

V praxi se můžeme setkat se třemi druhy rozvrhů [14]:

1. Semiaktivní rozvrh
2. Aktivní rozvrh
3. Rozvrh bez zpoždění

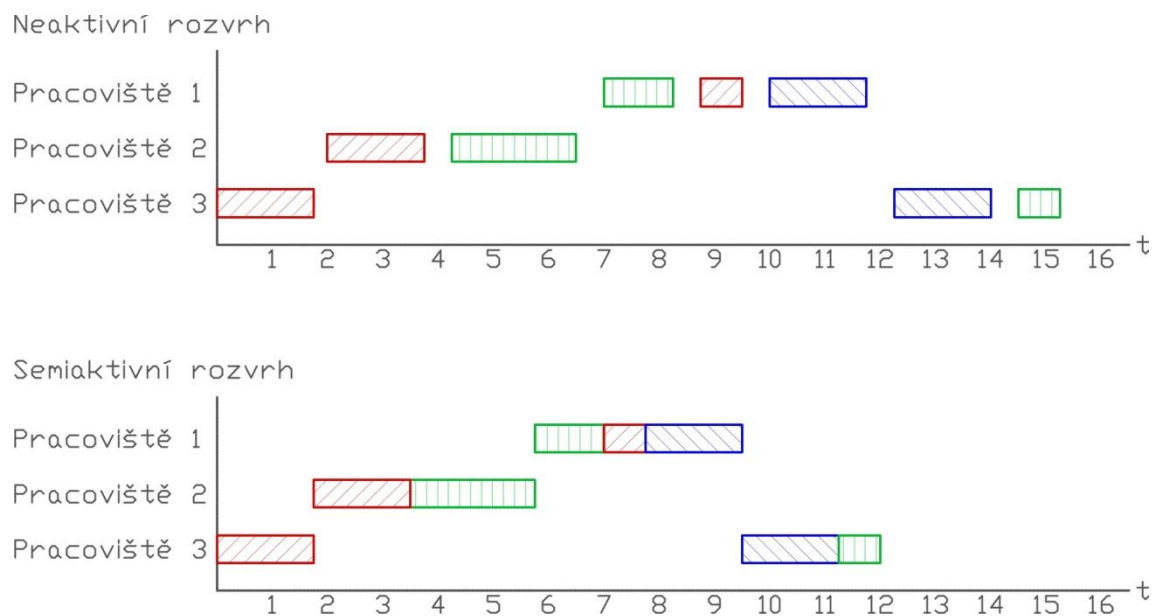


Obr. 2.4: Rozdělení rozvrhů [1]

Optimální rozvrh patří vždy do skupiny aktivních rozvrhů.

2.3.1 Semiaktivní rozvrh

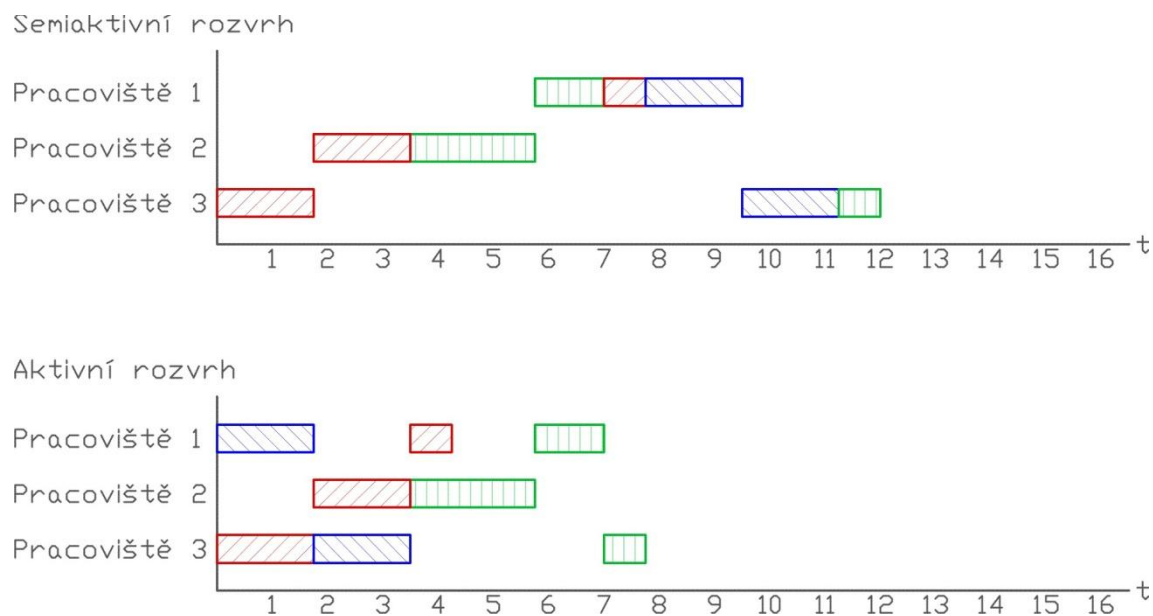
Rozvrh je semiaktivní, pokud neexistuje žádná operace, která by mohla být rozvrhována dříve, aniž by došlo ke změně pořadí operací na jednotlivých pracovištích. [14]



Obr. 2.5: Porovnání neaktivního a semiaktivního rozvrhu [8]

2.3.2 Aktivní rozvrh

Rozvrh je aktivní, pokud neexistuje žádná operace, která by mohla být rozvrhována dříve změnou pořadí operací na jednotlivých pracovištích, aniž by došlo ke zpoždění jiné operace. [14]

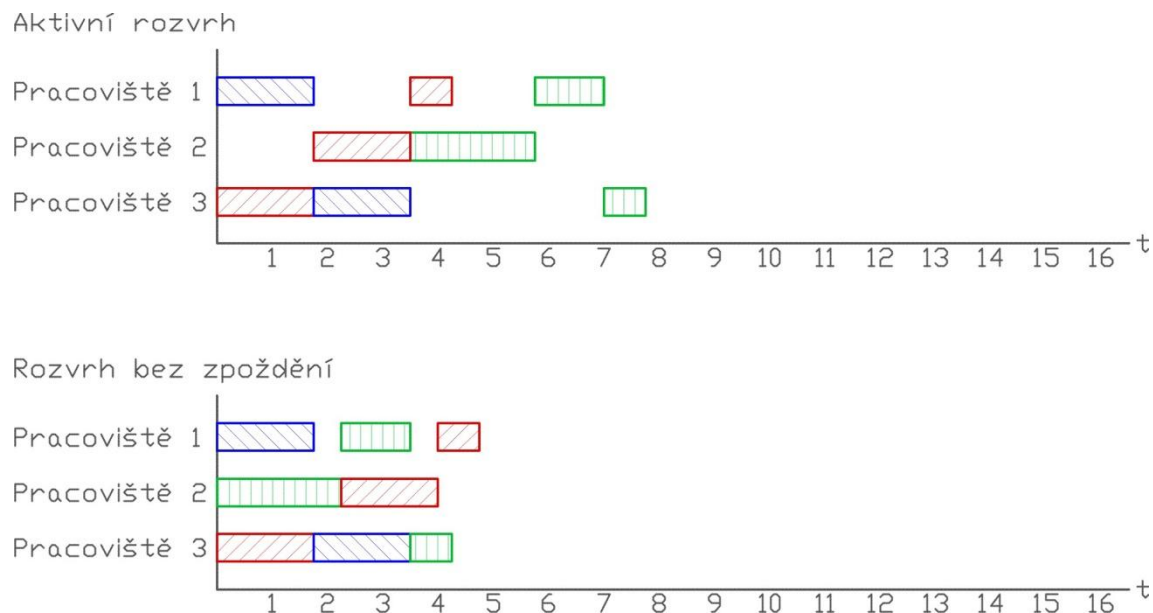


Obr. 2.6: Porovnání semiaktivního a aktivního rozvrhu [8]

Aktivní rozvrhy jsou podmnožinou rozvrhů semiaktivních. Nevýhodou oproti rozvrhům bez zpoždění je, že jich je velké množství a hledání řešení tak může trvat dlouho. Výhodou ovšem je, že mezi aktivními rozvrhy se vždy nachází rozvrh optimální. [3]

2.3.3 Rozvrh bez zpoždění

Rozvrh je bez zpoždění, pokud není volné pracoviště v době, kdy je dostupná jakákoliv operace. [14]



Obr. 2.7: Porovnání aktivního rozvrhu a rozvrhu bez zpoždění [8]

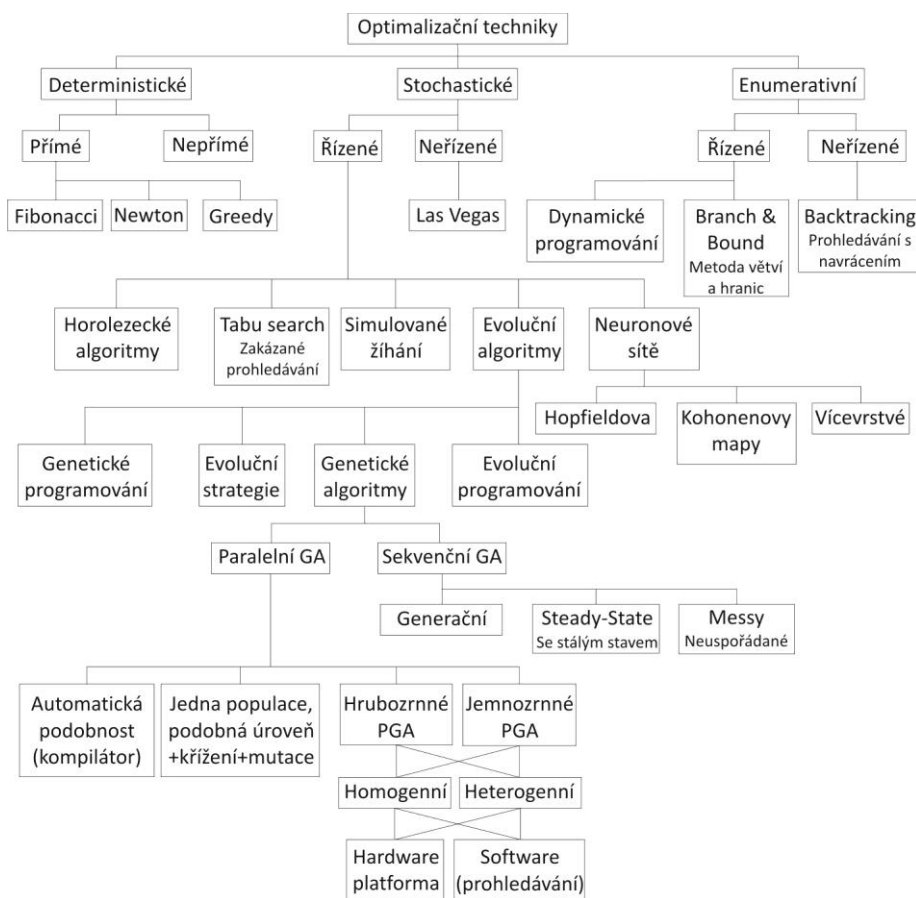
Rozvrhy bez zpoždění jsou podmnožinou rozvrhu aktivních. Je jich tak méně a hledání řešení trvá kratší dobu než u rozvrhů aktivních. V množině rozvrhů bez zpoždění se ovšem nemusí nacházet rozvrh optimální. [3]

3 Optimalizační algoritmy

Optimalizační algoritmy se používají pro řešení problémů v inženýrské praxi, kde je řešení daného problému analytickou cestou silně nevhodné anebo nereálné. Velké množství problémů inženýrské praxe lze definovat jako optimalizační problém (např. optimální trajektorie, optimální tloušťka stěny tlakové nádoby apod.), tzn., že řešený problém se může převést na matematický problém daný vhodným funkčním předpisem. Jeho optimalizace poté vede k nalezení argumentů tzv. účelové funkce, což je cílem optimalizace. [24]

3.1 Rozdělení optimalizačních algoritmů

Optimalizační algoritmy lze rozdělit podle principu jejich činnosti tak, jak je to uvedeno na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Možné uspořádání optimalizačních algoritmů [30]

Vlastnosti jednotlivých tříd algoritmů jsou následující [24]:

1) Deterministické optimalizační algoritmy

Skupina deterministických algoritmů využívá rigorózních (přesných) metod klasické matematiky. Tyto algoritmy většinou vyžadují předběžné předpoklady, které dovolí této metodě podávat efektivní výsledky. Mezi zmíněné předpoklady patří např.:

- problém je lineární
- prohledávaný prostor možných řešení je malý
- účelová funkce by měla být unimodální (má pouze jeden extrém)
- problém je definován v analytickém tvaru

Výsledkem deterministického algoritmu je jediné řešení

2) Stochastické optimalizační algoritmy

Skupina stochastických algoritmů je založena na využití náhody. V podstatě se jedná pouze o náhodné hledání hodnot argumentů účelové funkce. Výsledkem hledání je pouze nejlepší řešení, které bylo během cyklu náhodného hledání nalezeno. Algoritmy tohoto typu bývají:

- pomalé
- vhodné pro malý rozsah argumentů účelové funkce
- vhodné pro hrubý odhad

3) Enumerativní optimalizační algoritmy

Skupina enumerativních algoritmů počítá veškerá možná řešení daného problému. Tento přístup je vhodné využívat u problémů, jejichž argumenty účelové funkce jsou diskrétního charakteru a nabývají malého množství hodnot. Pokud by byla tato metoda využita obecně, mohla by na své dokončení potřebovat čas, který je delší nežli existence vesmíru.

3.2 Princip činnosti použitých optimalizačních algoritmů

V této práci se využilo pěti různých optimalizačních algoritmů:

- 1) Metoda náhodného prohledávání
- 2) Metoda hladového prohledávání
- 3) Metoda simulovaného žíhání
- 4) Metoda zakázaného prohledávání
- 5) Genetický algoritmus

3.2.1 Metoda náhodného prohledávání (Blind search – BS)

Náhodné prohledávání (někdy označováno jako slepý algoritmus) je nejjednodušším stochastickým algoritmem pro hledání globálního minima. Tento algoritmus opakovaně generuje náhodné řešení z oblasti D , které si zapamatuje pouze v tom případě, že je toto řešení lepší, než řešení zaznamenané v předchozí historii algoritmu. Tato metoda prohledávání neobsahuje žádnou strategii konstrukce řešení na základě předchozích řešení. Každé řešení je tak nezávislé na předcházejícím řešení. Výstupním parametrem po ukončení procedury je to řešení, které během procedury poskytlo nejnižší funkční hodnotu. [9], [16], [19]

3.2.2 Metoda hladového prohledávání (Greedy search – GS)

Metoda hladového prohledávání je další metodou vhodnou pro řešení optimalizačních problémů. Hledání optimálního řešení se provádí tak, že se hledá lokální optimum dílčích podproblémů, přičemž existuje šance, že se podaří nalézt optimum globální. Určení lokálního optima může vycházet z dříve nalezených optim, avšak nesmí se opírat o odhad řešení budoucích podproblémů. Metoda hladového prohledávání se uplatní tehdy, pokud je třeba z množiny řešení vybrat takové, které splňuje předem dané požadavky. [26], [28]

3.2.3 Metoda simulovaného žíhání (Simulated Annealing – SA)

Metoda simulovaného žíhání patří mezi stochastické algoritmy, které vycházejí ze základů fyziky. Metoda simulovaného žíhání vychází z analogie mezi žíháním tuhých těles a procesem řešení optimalizačních problémů.

Žíhání označuje ve fyzice proces, při kterém je do pece vyhřáté na vysokou teplotu umístěné těleso a pomalým snižováním teploty (žíháním) dochází k zániku defektů krystalové mřížky. Částice tělesa jsou při vysoké teplotě náhodně uspořádány v prostoru (těleso je roztopené). Vysoká teplota zvyšuje pravděpodobnost zániku defektů krystalické mřížky, pomalé ochlazování snižuje pravděpodobnost vzniku nových defektů. Při žíhání se částice tělesa snaží dostat do rovnovážné polohy (energie tělesa je minimální) – tj. krystal bez defektů. [12], [16]

3.2.4 Metoda zakázaného prohledávání (Tabu search – TS)

Metoda zakázaného prohledávání je upravenou verzí horolezeckého algoritmu. Ten funguje tak, že se na začátku optimalizace zvolí náhodné řešení z prostoru možných řešení, pro které se generuje pomocí konečné množiny transformací určité okolí a funkce se minimalizuje pouze v tomto okolí. Takto získané lokální řešení se použije jako střed nového okolí, ve kterém se lokální optimalizace opakuje. Počet lokálních optimalizací je předepsán. V průběhu procesu optimalizace se zaznamenává nejlepší řešení, které slouží jako výsledné optimální řešení. Základní nevýhodou horolezeckého algoritmu je, že se po určitém počtu iterací vrací k lokálnímu optimálnímu řešení nalezenému v dřívějším průběhu a tím dochází k zacyklení. [16], [24]

Metoda zakázaného prohledávání je doplněna o tzv. krátkodobou paměť, do které se ukládají inverzní transformace k lokálně optimálním transformačním řešením. Výsledkem je, že nedochází k zacyklení z důvodu zakázání transformací obsažených v krátkodobé paměti. [16], [24]

3.2.5 Genetický algoritmus (Genetic algorithm – GA)

Genetický algoritmus využívá principů evoluční biologie pro nalezení řešení složitých optimalizačních problémů. K tomu používá techniky napodobující evoluční procesy (dědičnost, mutace, přirozený výběr a křížení) pro „šlechtění“ řešení zadané úlohy. Princip genetického algoritmu spočívá v postupné tvorbě generací různých řešení zadaného problému, kde každá generace obsahuje tzv. populaci, jejíž každý jedinec představuje jedno řešení problému. V první generaci je populace složena z náhodně vybraných členů. Při přechodu do další generace je pro všechny jedince vypočtena tzv. fitness funkce určující kvalitu řešení představované daným jedincem. Podle fitness funkce jsou poté vybráni jedinci, kteří jsou modifikováni křížením a mutací. Tím vznikne nová, kvalitnější populace. Algoritmus se ukončí buď po předem dané době, nebo po dosažení postačující kvality řešení. [16], [19], [27]

4 Simcron MODELLER

Na trhu existuje celá řada simulačních systémů, které umožňují využití optimalizačních algoritmů (např. Witness, ARENA, SIMUL8 a další). V této práci byl k jednotlivým optimalizacím použit simulační systém Simcron MODELLER. Tato kapitola se proto zabývá použitými optimalizačními algoritmy, prioritními pravidly a účelovými funkcemi v tomto systému.

4.1 Optimalizační algoritmy

U optimalizačních algoritmů je nutné nastavit mnoho parametrů daného algoritmu, jejichž popis je uveden v nápovědě systému Simcron MODELLER. [31]

Nastavené parametry jednotlivých algoritmů:

- *Metoda náhodného prohledávání*
 - rozteč prohledávacího kroku 50 %
- *Metoda hladového prohledávání*
 - počet povolených chybných pokusů 10 000
 - velikost kroku na začátku 100 %
 - velikost kroku na konci 0 %
 - velikost tabu listu 10
- *Metoda simulovaného žhání*
 - počet povolených chybných pokusů 250
 - počáteční teplota 100
 - konečná teplota 0
 - odstupňování teplot 10 000
- *Metoda zakázaného prohledávání*
 - iterace 1 000
 - rozteč prohledávacího kroku 1
 - velikost tabu listu 10
 - lokální prohledávací krok na iteraci 50
- *Genetický algoritmus*
 - počet generací 400
 - velikost populace 200
 - typ výběru Ruletové pravidlo

Většina těchto parametrů je v systému Simcron nastavena standardně, avšak aby optimalizace nekončila předčasně, bylo nutné některé parametry nastavit ručně. Konkrétně jde o počet povolených chybných pokusů v metodě hladového prohledávání, odstupňování teplot v metodě simulovaného žíhání, iterace v metodě zakázaného prohledávání a počet generací a velikost populace u genetického algoritmu. Tyto parametry byly nastaveny tak, aby bylo prohledáno alespoň 10 000 možných řešení.

4.2 Prioritní pravidla

Řízení pomocí prioritních pravidel je důležitým nástrojem pro řízení výrobních procesů. V praxi bývají prioritní pravidla často nasazována, aniž by při tom musel být zřejmý jejich vědecký základ. Jedná se právě o zkušenosti, které se více méně v minulosti osvědčily. Prioritní pravidlo se stává účinným tehdy, pokud by se několik zakázek současně přesouvalo mezi jednotlivými stanovišti. Nastavené pravidlo pak rozhodne, v jakém pořadí se má transfer uskutečnit. Pokud jsou jednotlivá stanoviště přetížena, vytvoří se fronta sestávající se z dočasně odstavených zakázek. [31]

Podle toho, jaké prioritní pravidlo bylo nastaveno, jsou nově příchozí zakázky následně řazeny do fronty.

V praxi se můžeme setkat s celou řadou prioritních pravidel, která jsou popsána např. v [15], [18]. Systém Simcron však využívá pouze 14 následujících prioritních pravidel [31]:

- *Inverzní* – zařazení zakázky před všechny čekající zakázky (LIFO fronta – Last In First Out).
- *Priorita* – zařazení zakázky před všechny zakázky s menší prioritou a za všechny zakázky s prioritou větší nebo stejnou (pokud není hodnota priority v pracovním sledu uvedena, bude priorita ohodnocena).
- *Priorita inverzní* – zařazení zakázky za všechny zakázky s menší nebo stejnou prioritou a před všechny zakázky s prioritou větší (pokud není hodnota priority v pracovním sledu uvedena, bude priorita ohodnocena).

- *Nejdříve možný termín požadovaného dohotovení* – zařazení zakázky za všechny zakázky s dřívějším nebo stejným termínem dokončení a před všechny zakázky s pozdějším termínem dokončení.
- *Nejmenší difference mezi termínem dodání a zbývajícím časem práce* – zařazení zakázky před všechny zakázky s menším nebo stejným skluzem a za všechny zakázky s větším skluzem.
- *Nejkratší operační čas* – zařazení zakázky za všechny zakázky s kratším nebo stejným operačním časem a před všechny zakázky s delším operačním časem.
- *Nejkratší zbývající čas práce* – zařazení zakázky za všechny zakázky s kratším nebo stejným zbývajícím časem práce a před všechny zakázky s delším zbývajícím časem práce (= suma výrobních časů na všech následujících strojích).
- *Nejkratší celkový čas práce* – zařazení zakázky za všechny zakázky s kratším nebo stejným celkovým časem práce a před všechny zakázky s delším celkovým časem práce (= suma výrobních časů na všech strojích).
- *Nejméně zbývajících operací k provedení* – zařazení zakázky za všechny zakázky s menším nebo stejným počtem zbývajících operací k provedení a před všechny zakázky s větším počtem zbývajících operací k provedení.
- *Nejdelší operační čas* – zařazení zakázky za všechny zakázky s delším nebo stejným operačním časem a před všechny zakázky s kratším operačním časem.
- *Nejvyšší zbývající čas práce* – zařazení zakázky za všechny zakázky s vyšším nebo stejným zbývajícím časem práce a před všechny zakázky s nižším zbývajícím časem práce (= suma výrobních časů na všech následujících strojích).
- *Nejdelší celkový čas práce* – zařazení zakázky za všechny zakázky s delším nebo stejným celkovým časem práce a před všechny zakázky s kratším celkovým časem práce (= suma výrobních časů na všech strojích).
- *Nejvíce zbývajících operací k provedení* – zařazení zakázky za všechny zakázky s větším nebo stejným počtem zbývajících operací k provedení a před všechny zakázky s menším počtem zbývajících operací k provedení.
- *Normální* – zařazení zakázky za všechny čekající zakázky (FIFO fronta – First In First Out).

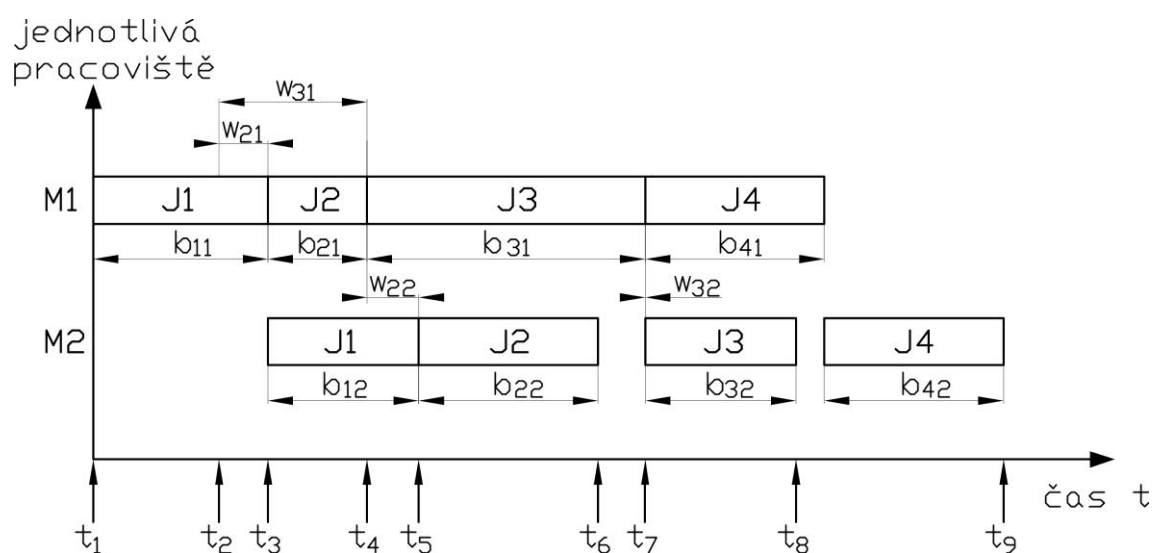
4.3 Účelové funkce

Účelové funkce slouží jako měřítko, podle kterého můžeme hodnotit efektivitu procesu.

V systému Simcron MODELLER lze využít následujících objektů pro stanovení účelové funkce: [31].

1. Dodržení termínu
2. Průběžná doba
3. Vytížení strojů
4. Obsazení strojů

Průběžná doba – doba mezi přípravou, příp. prvním opracováním zakázky a jejím dokončením.



t_1 – čas, kdy jsou k výrobě připraveny zakázky J1 a J4

t_2 – čas, kdy jsou k výrobě připraveny zakázky J2 a J3

t_1 – začátek obrábění zakázky J1

t_5 – dokončení zakázky J1

t_3 – začátek obrábění zakázky J2

t_6 – dokončení zakázky J2

t_4 – začátek obrábění zakázky J3

t_8 – dokončení zakázky J3

t_7 – začátek obrábění zakázky J4

t_9 – dokončení zakázky J4

w_{jm} – doba čekání zakázky Jj na stroji Mm (v tomto případě $j = 1 - 4$, $m = 1 - 2$)

b_{jm} – doba obrábění zakázky Jj na stroji Mj (v tomto případě $j = 1 - 4$, $m = 1 - 2$)

Obr. 4.1: Ganttův diagram - průběžná doba výroby [31]

- Celková průběžná doba výroby – doba mezi přípravou první ze sledovaných zakázek a dokončením poslední ze sledovaných zakázek. Např. zakázky J2 a J3, zobrazené v Ganttově diagramu na obr. 4.1, jsou připraveny v čase t_2 a dokončení poslední zakázky nastane v čase t_8 . Celková průběžná doba výroby T_t zakázek J2 a J3 se pak vypočítá podle vztahu $T_t = t_8 - t_2$.
- Střední celková průběžná doba výroby – střední hodnota celkových průběžných dob výroby jednotlivých zakázek. Jako příklad opět poslouží zakázky J2 a J3 z obr. 4.1. Celková průběžná doba výroby zakázky J2 se vypočítá ze vztahu $T_2 = t_6 - t_2$, celková průběžná doba výroby zakázky J3 se vypočítá ze vztahu $T_3 = t_8 - t_2$. Střední celková průběžná doba výroby se pak vypočítá podle vztahu $T_m = (T_2 + T_3) / J$, kde J je počet sledovaných zakázek (v tomto případě $J = 2$).
- Střední doba čekání – střední hodnota čekání jednotlivých zakázek. Doba čekání zakázky J2 se vypočítá podle vztahu $W_2 = w_{21} + w_{22}$, doba čekání zakázky J3 se vypočítá podle vztahu $W_3 = w_{31} + w_{32}$. Střední doba čekání se pak vypočítá podle vztahu $W_m = (W_2 + W_3) / J$, kde J je počet sledovaných zakázek (v tomto případě $J = 2$).

Vytížení strojů – poměr aktivně obsazené pracovní kapacity k dostupné výrobní kapacitě, anebo k celkové výrobní kapacitě strojů. V této práci jde o poměr aktivně obsazené pracovní kapacity k dostupné výrobní kapacitě.

Zpoždění - Časové rozpětí mezi posledním termínem dokončení zakázky a skutečným dokončením zakázky. V této práci byla použita účelová funkce „suma všech zpoždění“, což je součet zpoždění veškerých sledovaných zakázek.

5 Teoretické modely výroby

Jedním z cílů této diplomové práce je posouzení efektivnosti optimalizačních algoritmů. K tomu byly využity teoretické modely výroby, což jsou příklady, jejichž výsledek je předem známý (výsledkem se rozumí hodnota nejkratší celkové průběžné doby výroby – tzv. globální optimum), a proto slouží k testování jednotlivých optimalizačních metod a jejich nastavení v optimalizačních systémech.

Tato kapitola se zabývá modely výroby typu job shop. Tyto modely byly optimalizovány s využitím pěti různých optimalizačních algoritmů (metoda náhodného prohledávání, metoda hladového prohledávání, metoda simulovaného žihání, metoda zakázaného prohledávání, genetický algoritmus) a dosažené výsledky byly porovnány se známými optimy těchto modelů.

5.1 Optimalizace pomocí optimalizačních algoritmů

Celkem byla provedena optimalizace u deseti různých teoretických modelů (ft06, ft10, ft20, la02, la19, la21, la27, la30, la40, sw11). Každý model se liší v počtu strojů a v počtu zakázek, které se mají na všech strojích zpracovat. Každý příklad byl optimalizován s využitím všech pěti algoritmů, přičemž optimalizace pomocí jednotlivých algoritmů proběhla vždy pětikrát a nakonec byla vypočtena průměrná hodnota z těchto pěti dosažených hodnot. Tato měření byla prováděna pro dva různé druhy rozvrhů:

- Rozvrh bez zpoždění
- Aktivní rozvrh

Celkem tedy bylo provedeno 500 měření ($10 \text{ příkladů} \times 5 \text{ algoritmů} \times 2 \text{ rozvrhy} \times 5 \text{ měření každého algoritmu}$).

Jak již bylo řečeno dříve, úlohy rozvrhování patří mezi kombinatorické problémy a počet možných řešení je konečný. V úlohách typu job shop je to celkem $(n!)^m$ řešení („n“ odpovídá počtu zakázek, „m“ představuje počet pracovišť). [23] I když různá omezení (např. technologií) množinu rozvrhů značně redukuje, není možné v přípustné době prohledat veškerá možná řešení. Maximální počet prohledávaných iterací byl proto

nastaven na 10 000 a maximální doba optimalizace byla nastavena na 15 minut. Zaznamenávány byly následující údaje:

- výsledek optimalizace (minimální hodnota celkové průběžné doby výroby)
- doba optimalizace
- pořadí iterace, při které byl výsledek nalezen
- počet iterací (pokud nebylo prohledáno 10 000 řešení během 15 minut)

5.1.1 Zadání teoretických modelů

Zadání jednotlivých příkladů je uvedeno v tabulkách v Příloze I. Jednotlivé řádky ve zmíněných tabulkách představují jednotlivé zakázky a sloupce v těchto tabulkách udávají tok těchto zakázek mezi jednotlivými pracovišti, kdy každý lichý sloupec označuje číslo stroje, na němž je daná zakázka právě zpracovávána, a každý sudý sloupec představuje dobu zpracování zakázky na daném stroji. Pokud je tedy v prvním řádku uvedeno např. 3 9 2 4..., tak to znamená, že zakázka č. 1 bude nejprve zpracovávána na stroji 3 po dobu devíti časových jednotek. Poté zakázka přejde ke stroji 2, kde bude zpracovávána 4 časové jednotky atd.

V následující tabulce jsou uvedeny známé výsledky jednotlivých teoretických modelů výroby, se kterými jsou dále porovnávány výsledky optimalizace:

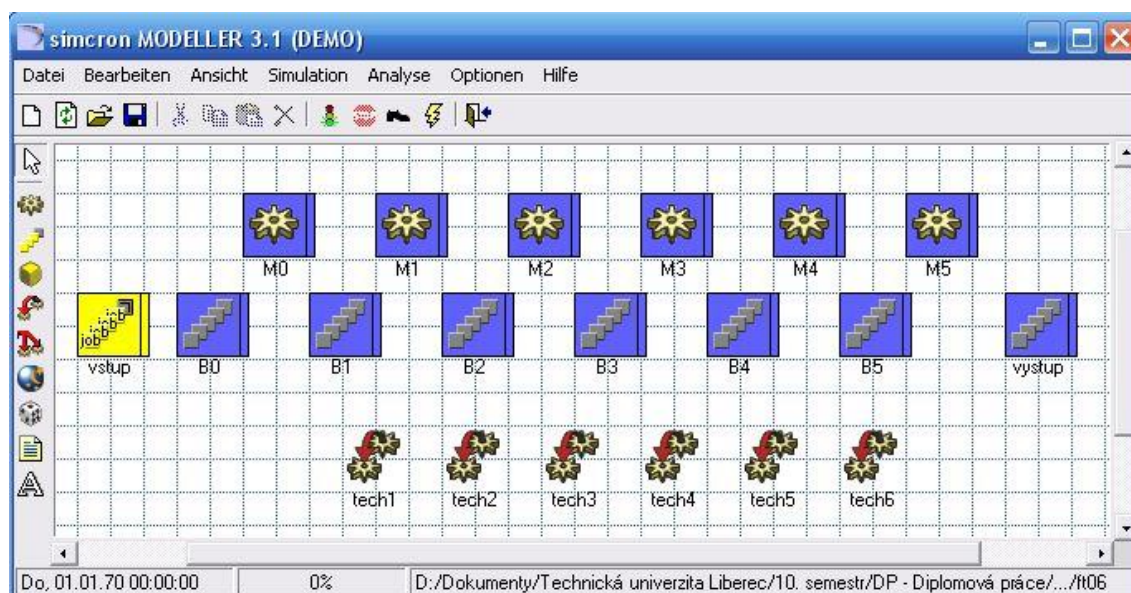
Tab. 5.1: Známá optima teoretických modelů výroby

Příklad	počet zakázek	počet strojů	optimum [s]
ft06	6	6	55
ft10	10	10	930
ft20	20	5	1 165
la02	10	5	655
la19	10	10	842
la21	15	10	1 046
la27	20	10	1 235
la30	20	10	1 355
la40	15	15	1 222
sw11	50	10	2 983

5.1.2 Optimalizace teoretických modelů s využitím rozvrhu bez zpoždění

Teoretické modely výroby byly vytvořeny v systému Simcron MODELLER. Využilo se přitom čtyř základních prvků systému Simcron – stroj, zásobník, zakázka a technologie, přičemž počet strojů a zakázek je dán zadáním příkladu, počet technologií odpovídá počtu zakázek (každá zakázka se vyrábí podle vlastní technologie) a počet zásobníků je dán počtem strojů, ke kterému je nutné připočítat dva zásobníky navíc (zásobník zakázek u každého stroje plus zásobník vstupní a výstupní).

Na následujícím obrázku je ukázka simulačního modelu v systému Simcron MODELLER:



Obr. 5.1: Model příkladu ft06

Na obrázku je vidět 6 strojů (prvky označené M0 – M5), 8 zásobníků (prvky označené B0 – B5, vstup a vystup) a 6 použitých technologií (prvky označené tech1 – tech6). Šest zakázek, které nejsou na obrázku vidět, je již zaplánováno, a proto má vstupní zásobník jinou barvu než zásobníky ostatní.

Jedním z nejčastěji využívaných prioritních pravidel v systémech ERP je prioritní pravidlo „nejkratší operační čas“. [7] Proto bylo provedeno nejprve řízení

zakázek teoretických modelů s využitím tohoto pravidla. Výsledkem byla hodnota celkové průběžné doby výroby. Tyto výsledky jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 5.2: Dosažené výsledky při řízení zakázek prioritním pravidlem

Příklad	Výsledek [s]	doba simulace [s]	Příklad	Výsledek [s]	doba simulace [s]
ft06	88	1	la21	1324	1
ft10	1074	1	la27	1784	1
ft20	1267	1	la30	1792	1
la02	821	1	la40	1476	1
la19	940	1	sw11	3668	1

Po provedení optimalizace pomocí prioritního pravidla následovala optimalizace pomocí optimalizačních algoritmů, která probíhala na dvou různě výkonných počítačích, aby byl zjištěn vliv výkonu PC na dobu optimalizace.

- Méně výkonné PC: Intel Pentium 4, 2 GHz, 512 MB RAM
- Více výkonné PC: Intel Core2Duo, 3 GHz, 3 GB RAM

Na méně výkonném PC byla provedena 2 měření, na více výkonném PC byla provedena 3 měření.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloze II, v následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřených hodnot.

V jednotlivých sloupcích následujících deseti tabulek jsou uvedeny tyto údaje:

1. Průměrný výsledek optimalizace (z pěti měření)
2. Chyba vůči známému optimu
3. Zlepšení výsledku vůči výsledku prioritního pravidla
4. Průměrná doba optimalizace na méně výkonném PC (ze dvou měření)
5. Průměrná doba optimalizace na více výkonném PC (ze tří měření)
6. Průměrné pořadí iterace, při které byl nalezen výsledek
7. Průměrný počet prohledaných iterací – pouze u modelu sw11 (ze dvou měření)

Tab. 5.3: Průměrné hodnoty - model ft06 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 55

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]
Metoda náhodného prohledávání	57	3,6	35,2	04:40	01:22	3261
Metoda hladového prohledávání	57	3,6	35,2	05:41	01:38	820
Metoda simulovaného žíhání	58	5,5	34,1	06:04	01:49	3053
Metoda zakázaného prohledávání	57	3,6	35,2	04:59	01:22	1092
Genetický algoritmus	57	3,6	35,2	05:00	01:26	244

Tab. 5.4: Průměrné hodnoty - model ft10 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 930

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1012	8,8	5,8	07:01	01:54	5673
Metoda hladového prohledávání	980	5,4	8,7	08:21	02:24	7175
Metoda simulovaného žíhání	1013	8,9	5,7	07:34	02:13	6911
Metoda zakázaného prohledávání	998	7,3	7,1	07:07	01:57	3065
Genetický algoritmus	984	5,8	8,4	08:20	02:25	6633

Tab. 5.5: Průměrné hodnoty - model ft20 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 1 165

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1240	6,4	2,2	08:31	02:18	3995
Metoda hladového prohledávání	1195	2,5	5,7	10:17	02:53	9120
Metoda simulovaného žíhání	1231	5,6	2,9	09:18	02:34	7857
Metoda zakázaného prohledávání	1236	6,1	2,5	08:42	02:21	4047
Genetický algoritmus	1196	2,7	5,6	11:04	03:04	7224

Tab. 5.6: Průměrné hodnoty - model la02 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 655

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]
Metoda náhodného prohledávání	700	6,9	14,7	06:08	01:33	5370
Metoda hladového prohledávání	679	3,6	17,3	07:22	01:55	5678
Metoda simulovaného žíhání	696	6,3	15,2	06:26	01:53	6307
Metoda zakázaného prohledávání	690	5,4	15,9	05:43	01:34	2689
Genetický algoritmus	680	3,8	17,2	06:46	01:58	6619

Tab. 5.7: Průměrné hodnoty - model la19 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 842

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]
Metoda náhodného prohledávání	875	4,0	6,9	06:53	01:54	5558
Metoda hladového prohledávání	875	4,0	6,9	08:31	02:24	2254
Metoda simulovaného žíhání	878	4,3	6,6	08:13	02:13	7217
Metoda zakázaného prohledávání	876	4,0	6,9	07:33	01:57	4271
Genetický algoritmus	875	3,9	6,9	08:24	02:22	4847

Tab. 5.8: Průměrné hodnoty - model la21 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 1 046

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1153	10,2	12,9	08:39	02:27	4985
Metoda hladového prohledávání	1117	6,8	15,6	11:13	03:08	9067
Metoda simulovaného žíhání	1146	9,6	13,4	09:13	02:38	8553
Metoda zakázaného prohledávání	1131	8,2	14,5	09:11	02:31	3964
Genetický algoritmus	1118	6,9	15,6	10:51	03:05	7616

Tab. 5.9: Průměrné hodnoty - model la27 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 1 235

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1395	13,0	21,8	11:04	03:26	4671
Metoda hladového prohledávání	1337	8,2	25,1	14:20	03:59	9454
Metoda simulovaného žíhání	1372	11,1	23,1	11:20	03:11	8477
Metoda zakázaného prohledávání	1356	9,8	24,0	11:23	03:10	6794
Genetický algoritmus	1337	8,3	25,1	13:20	03:52	8043

Tab. 5.10: Průměrné hodnoty - model la30 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 1 355

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1456	7,4	18,8	11:03	03:13	5784
Metoda hladového prohledávání	1417	4,6	20,9	14:19	03:59	9457
Metoda simulovaného žíhání	1441	6,3	19,6	11:26	03:12	6936
Metoda zakázaného prohledávání	1412	4,2	21,2	11:35	03:09	3878
Genetický algoritmus	1402	3,5	21,8	13:47	03:51	7115

Tab. 5.11: Průměrné hodnoty - model la40 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 1 222

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1333	9,1	9,7	11:04	03:07	6039
Metoda hladového prohledávání	1303	6,6	11,7	14:27	04:02	8389
Metoda simulovaného žíhání	1335	9,2	9,6	11:19	03:15	6727
Metoda zakázaného prohledávání	1313	7,4	11,1	11:30	03:11	4332
Genetický algoritmus	1302	6,6	11,8	13:22	03:54	7104

Tab. 5.12: Průměrné hodnoty - model sw11 - rozvrh bez zpoždění

Znamé optimum [s]: 2 983

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [mm:ss]	6. [-]	7. [-]
Metoda náhodného prohledávání	3531	18,4	3,7	15:00	08:43	4254	4856
Metoda hladového prohledávání	3570	19,7	2,7	15:00	11:32	6737	3182
Metoda simulovaného žíhání	3487	16,9	4,9	15:00	08:27	4925	4828
Metoda zakázaného prohledávání	3435	15,2	6,3	15:00	09:02	3137	4867
Genetický algoritmus	3499	17,3	4,6	15:00	11:27	6364	3791

Při pohledu na uvedené výsledky jsou patrné rozdíly mezi použitými metodami optimalizace (prioritní pravidlo vs. optimalizační algoritmy). Optimalizační algoritmy poskytnou sice přesnější výsledek nežli použité prioritní pravidlo, avšak za mnohem delší dobu. U optimalizačních algoritmů je navíc důležitý výkon PC, zatímco u prioritního pravidla nebyl vliv výkonu PC pozorován. Nejvíce je tento jev patrný na příkladu sw11, čili na nejnáročnějším příkladu. Optimalizace s využitím optimalizačních algoritmů trvala na méně výkonném počítači přesně 15 minut (což byla maximální povolená doba optimalizace), a i přesto nebylo prohledáno maximální množství řešení (10 000).

5.1.3 Optimalizace teoretických modelů s využitím aktivního rozvrhu

Aby bylo možné teoretické modely optimalizovat podle aktivního rozvrhu, bylo nutné je nejprve na aktivní rozvrh převést. K tomu byly využity modely vytvořené pro rozvrh bez zpoždění, do kterých byl nahrán skript „*aktivní plán*“ poskytnutý výrobcem systému Simcron. Tento skript ovšem obsahuje určitá zjednodušení, kvůli kterým nejsou pokryty veškeré aktivní rozvrhy, a tak neposkytuje všechna možná řešení.

Optimalizace probíhala stejně jako v předchozí části (optimalizace s využitím rozvrhu bez zpoždění). Tzn. nejdříve řízení zakázek podle prioritního pravidla, poté pět měření pomocí optimalizačních algoritmů. Všechny těchto pět měření proběhlo na výkonnějším PC.

Tab. 5.13: Dosažené výsledky při řízení zakázek prioritním pravidlem

Příklad	Výsledek [s]	doba simulace [s]	Příklad	Výsledek [s]	doba simulace [s]
ft06	91	1	la21	1600	1
ft10	1305	1	la27	1981	1
ft20	1771	1	la30	2069	1
la02	935	1	la40	1679	1
la19	1203	1	sw11	4565	1

Naměřené hodnoty pomocí optimalizačních algoritmů jsou uvedeny v Příloze III, v následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřených hodnot.

V jednotlivých sloupcích následujících deseti tabulek jsou uvedeny tyto údaje:

1. Průměrný výsledek optimalizace
2. Chyba vůči známému optimu
3. Zlepšení výsledku vůči výsledku prioritního pravidla
4. Průměrná doba optimalizace
5. Průměrné pořadí iterace, při které byl nalezen výsledek

Tab. 5.14: Průměrné hodnoty - model ft06 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 55

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	60	8,4	34,5	00:57	4526
Metoda hladového prohledávání	57	4,4	36,9	01:05	3629
Metoda simulovaného žíhání	61	10,9	33,0	00:55	3178
Metoda zakázaného prohledávání	59	6,5	35,6	01:07	4629
Genetický algoritmus	59	6,5	35,6	01:07	4518

Tab. 5.15: Průměrné hodnoty - model ft10 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 930

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1157	24,4	11,4	02:06	5894
Metoda hladového prohledávání	1086	16,7	16,8	02:37	9497
Metoda simulovaného žíhání	1152	23,9	11,7	02:21	8321
Metoda zakázaného prohledávání	1149	23,6	11,9	02:15	5595
Genetický algoritmus	1063	14,3	18,5	03:25	8354

Tab. 5.16: Průměrné hodnoty - model ft20 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 1 165

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1395	19,7	21,3	02:33	3784
Metoda hladového prohledávání	1360	16,8	23,2	03:04	9303
Metoda simulovaného žíhání	1380	18,5	22,1	02:42	5285
Metoda zakázaného prohledávání	1400	20,2	20,9	02:30	2923
Genetický algoritmus	1346	15,5	24,0	03:09	8203

Tab. 5.17: Průměrné hodnoty - model la02 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 655

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	740	13,0	20,8	01:42	5334
Metoda hladového prohledávání	706	7,8	24,5	02:04	8490
Metoda simulovaného žíhání	742	13,3	20,6	01:55	8662
Metoda zakázaného prohledávání	739	12,8	21,0	01:44	4307
Genetický algoritmus	703	7,4	24,8	02:09	8065

Tab. 5.18: Průměrné hodnoty - model la19 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 842

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1006	19,4	16,4	02:07	7472
Metoda hladového prohledávání	950	12,8	21,0	02:35	9481
Metoda simulovaného žíhání	1001	18,9	16,8	02:21	6262
Metoda zakázaného prohledávání	979	16,2	18,6	02:14	4272
Genetický algoritmus	940	11,6	21,9	02:43	7496

Tab. 5.19: Průměrné hodnoty - model la21 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 1 046

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1367	30,7	14,6	02:57	3127
Metoda hladového prohledávání	1308	25,0	18,3	03:20	9524
Metoda simulovaného žíhání	1356	29,7	15,2	02:53	6616
Metoda zakázaného prohledávání	1327	26,9	17,1	02:48	3445
Genetický algoritmus	1301	24,4	18,7	03:24	7532

Tab. 5.20: Průměrné hodnoty - model la27 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 1 235

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1690	36,8	14,7	03:28	5860
Metoda hladového prohledávání	1621	31,3	18,2	04:28	9424
Metoda simulovaného žíhání	1688	36,7	14,8	03:47	7123
Metoda zakázaného prohledávání	1634	32,3	17,5	03:27	4613
Genetický algoritmus	1580	27,9	20,2	04:21	8280

Tab. 5.21: Průměrné hodnoty - model la30 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 1 355

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1725	27,3	16,6	03:28	3718
Metoda hladového prohledávání	1658	22,4	19,9	04:27	9759
Metoda simulovaného žíhání	1728	27,5	16,5	03:42	5058
Metoda zakázaného prohledávání	1663	22,7	19,6	03:28	6178
Genetický algoritmus	1630	20,3	21,2	04:09	8058

Tab. 5.22: Průměrné hodnoty - model la40 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 1 222

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	1612	31,9	4,0	03:37	5303
Metoda hladového prohledávání	1522	24,5	9,4	04:19	8913
Metoda simulovaného žíhání	1570	28,5	6,5	03:34	7963
Metoda zakázaného prohledávání	1543	26,3	8,1	03:40	4823
Genetický algoritmus	1479	21,0	11,9	04:14	8591

Tab. 5.23: Průměrné hodnoty - model sw11 - aktivní rozvrh

Znamé optimum [s]: 2 983

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [%]	3. [%]	4. [mm:ss]	5. [-]
Metoda náhodného prohledávání	4075	36,6	10,7	09:14	2140
Metoda hladového prohledávání	4238	42,1	7,2	11:17	8426
Metoda simulovaného žíhání	4054	35,9	11,2	09:12	4935
Metoda zakázaného prohledávání	4081	36,8	10,6	08:59	3843
Genetický algoritmus	4141	38,8	9,3	12:23	9217

U optimalizace aktivního rozvrhu teoretických modelů se opět projeví rozdíly mezi jednotlivými druhy optimalizace. Na straně jedné jsou výsledky přesnější, ovšem za cenu delší doby optimalizace (optimalizační algoritmy), na straně druhé jsou výsledky méně uspokojivé, avšak k dispozici během několika mála okamžiků (prioritní pravidla).

5.2 Zhodnocení dosažených výsledků

V Tab. 5.25 jsou bodově ohodnoceny jednotlivé optimalizační algoritmy, u kterých se bodovaly tři parametry:

1. chyba výsledku vůči optimu
2. doba optimalizace
3. pořadí iterace, při které byl nalezen výsledek

Bodovány byly průměrné hodnoty naměřených hodnot.

Bodování bylo následující:

Tab. 5.24: Bodování optimalizačních algoritmů

počet bodů	chyba vůči optimu [%]	doba optimalizace [mm:ss]	pořadí iterace [-]
5 bodů	0 – 5	0:00 – 3:00	0. – 2 000.
4 body	5,1 – 10	3:01 – 6:00	2 001. – 4 000.
3 body	10,1 – 15	6:01 – 9:00	4 001. – 6 000.
2 body	15,1 – 20	9:01 – 12:00	6 001. – 8 000.
1 bod	20,1 a více	12:01 – 15:00	8 001. – 10 000.

Jednotlivé parametry měly různou váhu:

1. chyba výsledku vůči optimu: 60 %
2. doba optimalizace: 30 %
3. pořadí iterace: 10 %

Celkovým maximem je 100 bodů.

Tab. 5.25: Počet dosažených bodů

		Algoritmus	ft06	ft10	ft20	la02	la19	la21	la27	la30	la40	sw11
chyba výsledku	bez zpožd.	náhodné proh.	5	4	4	4	5	3	3	4	4	2
		hladové proh.	5	4	5	5	5	4	4	5	4	2
		simulované žíh.	4	4	4	4	5	4	3	4	4	2
		zakázané proh.	5	4	4	4	5	4	4	5	4	2
		genetický alg.	5	4	5	5	5	4	4	5	4	2
	aktivní	náhodné proh.	4	1	2	3	2	1	1	1	1	1
		hladové proh.	4	2	2	4	3	1	1	1	1	1
		simulované žíh.	3	1	2	3	2	1	1	1	1	1
		zakázané proh.	4	1	1	3	2	1	1	1	1	1
		genetický alg.	4	3	2	4	3	1	1	1	1	1
doba optimalizace	bez zpožd.	náhodné proh.	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3
		hladové proh.	5	5	5	5	5	4	4	4	4	2
		simulované žíh.	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3
		zakázané proh.	5	5	5	5	5	5	4	4	4	2
		genetický alg.	5	5	4	5	5	4	4	4	4	2
	aktivní	náhodné proh.	5	5	5	5	5	5	4	4	4	2
		hladové proh.	5	5	4	5	5	4	4	4	4	2
		simulované žíh.	5	5	5	5	5	5	4	4	4	2
		zakázané proh.	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3
		genetický alg.	5	4	4	5	5	4	4	4	4	1
pořadí iterace	bez zpožd.	náhodné proh.	4	3	4	3	3	3	3	3	2	3
		hladové proh.	5	2	1	3	4	1	1	1	1	2
		simulované žíh.	4	2	2	2	2	1	1	2	2	3
		zakázané proh.	5	4	3	4	3	4	2	4	3	4
		genetický alg.	5	2	2	2	3	2	1	2	2	2
	aktivní	náhodné proh.	3	3	4	3	2	4	3	4	3	4
		hladové proh.	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		simulované žíh.	4	1	3	1	2	2	2	3	2	3
		zakázané proh.	3	3	4	3	3	4	3	2	3	4
		genetický alg.	3	1	1	1	2	2	1	1	1	1

Tab. 5.26: Celkový počet dosažených bodů

Algoritmus	Body celkem			přepočet podle váhy			výsledek
	60%	30%	10%				
Metoda náhodného prohledávání	55	89	64	33,0	26,7	6,4	66,1
Metoda hladového prohledávání	63	85	34	37,8	25,5	3,4	66,7
Metoda simulovaného žíhání	54	89	44	32,4	26,7	4,4	63,5
Metoda zakázaného prohledávání	57	89	68	34,2	26,7	6,8	67,7
Genetický algoritmus	64	82	37	38,4	24,6	3,7	66,7

Podle uvedeného bodování se nejlepší metodou stala metoda zakázaného prohledávání se ziskem 67,7 bodů ze 100 a naopak nejhorší metodou se stala metoda simulovaného žíhání se ziskem 63,5 bodů.

Ačkoliv nejvyššího počtu bodů dosáhla metoda zakázaného prohledávání, tak bych jako vítěze označil genetický algoritmus, který ztratil body především kvůli nejméně důležitému parametru (pořadí iterace, při které byl nalezen výsledek), na kterém naopak metoda zakázaného prohledávání nejvíce „vydělala“.

6 Model lisovny

Tento příklad je modelem dílny, ve které je 22 strojů (lisů). Tyto stroje obsluhuje dohromady 10 lidí (3 seřizovači lisů a 7 pracovníků obsluhy lisů), jejichž úkolem je co nejefektivněji zpracovat všechny zakázky. Každá zakázka se vyrábí vždy na jednom stroji. Seřizovači lisů musí nastavit každý stroj k práci před každou zakázkou, pracovníci obsluhy lisů zajišťují plynulý chod práce na strojích. Tito pracovníci obsluhují v jednu chvíli vždy pouze jeden stroj – není tedy možné zahájit práci na jednom stroji a mezitím jít pracovat ke stroji druhému. Cílem modelu lisovny je zoptimalizovat zpracovávání jednotlivých zakázek tak, aby výroba probíhala co nejefektivněji podle požadované účelové funkce.

K optimalizaci pracovního cyklu byl použit model lisovny, který byl vytvořen v systému Simcron. Optimalizace probíhala dvěma způsoby:

1. Řízení zakázek pomocí prioritních pravidel
2. Optimalizace pomocí optimalizačních algoritmů

6.1 Řízení zakázek pomocí prioritních pravidel

Řízení zakázek pomocí prioritních pravidel je nejrychlejší optimalizační metodou v systému Simcron, jelikož optimalizace proběhne vždy během jedné vteřiny a výsledky jsou tak k dispozici téměř okamžitě (k celkové době simulace je třeba ještě přičíst dobu nastavení daného prioritního pravidla, což je přibližně 10 sekund – změřeno pomocí stopek). Při řízení zakázek pomocí prioritních pravidel v systému Simcron je výsledkem optimalizace hodnota účelové funkce, kterých lze v systému Simcron nastavit mnoho, avšak v tomto příkladě (model lisovny) bylo použito pouze pěti z nich (celková průběžná doba výroby, střední celková průběžná doba výroby, střední doba čekání, suma všech zpoždění, vytížení strojů).

6.1.1 Naměřené hodnoty

Řízení modelu lisovny pomocí prioritních pravidel předcházela simulace modelu bez použití prioritních pravidel (pořadí zakázek pocházelo z IS řízení výroby). Tím byl získán výsledek neoptimalizovaného modelu. Po této simulaci se prováděly

optimalizace s využitím jednotlivých prioritních pravidel, přičemž byly zaznamenány výsledky všech pěti sledovaných účelových funkcí.

V následující tabulce jsou uvedeny tyto údaje:

1. výsledek účelové funkce „celková průběžná doba výroby“
2. výsledek účelové funkce „střední celková průběžná doba výroby“
3. výsledek účelové funkce „střední doba čekání“
4. výsledek účelové funkce „suma všech zpoždění“
5. výsledek účelové funkce „vytížení strojů“
6. doba optimalizace

Tab. 6.1: Výsledky účelových funkcí při řízení prioritními pravidly

Prioritní pravidla	Účelové funkce					6. [s]
	1. [d:h:mm:ss]	2. [d:h:mm:ss]	3. [d:h:mm:ss]	4. [d:h:mm:ss]	5. [%]	
bez pravidla	6:15:42:06	2:10:17:33	0:21:31:53	10:22:29:12	41,6	1
Inverzní	8:00:48:09	2:10:19:00	0:21:43:33	33:08:43:29	34,2	1
Priorita	6:15:42:06	2:10:17:33	0:21:31:53	10:22:29:12	41,6	1
Priorita inverzní	6:15:42:06	2:10:17:33	0:21:31:53	10:22:29:12	41,6	1
Nejdříve možný termín požadovaného dohotovení	6:15:42:06	2:10:17:33	0:21:31:53	10:22:29:12	41,6	1
Nejmenší diference mezi termínem dodání a zbývajícím časem práce	8:22:23:09	2:14:47:35	1:02:12:07	17:13:09:34	30,6	1
Nejkratší operační čas	6:15:42:06	2:10:17:33	0:21:31:53	10:22:29:12	41,6	1
Nejkratší zbývající čas práce	7:11:20:08	2:03:18:12	0:14:32:31	15:21:58:34	36,9	1
Nejkratší celkový čas práce	7:11:20:08	2:03:18:12	0:14:32:31	15:21:58:34	36,9	1
Nejméně zbývajících operací k provedení	6:15:42:06	2:09:41:19	0:20:55:38	10:04:02:36	41,6	1
Nejdelší operační čas	6:15:42:06	2:10:17:33	0:21:31:53	10:22:29:12	41,6	1
Nejvyšší zbývající čas práce	8:18:23:09	2:17:59:21	1:05:23:53	30:21:15:00	31,2	1
Nejdelší celkový čas práce	8:18:23:09	2:17:59:21	1:05:23:53	30:21:15:00	31,2	1
Nejvíce zbývajících operací k provedení	6:21:45:20	2:15:00:13	1:02:04:20	18:19:35:23	39,9	1
Normální	6:15:42:06	2:10:17:33	0:21:31:53	10:22:29:12	41,6	1

6.1.2 Zhodnocení dosažených výsledků

V tab. 6.1 jsou zelenou barvou označeny výsledky, které byly řízením pomocí prioritních pravidel zlepšeny, červenou barvou jsou označeny výsledky, které byly naopak zhoršeny. Nezvýrazněné výsledky jsou shodné s výsledkem bez využití prioritního pravidla.

Z výsledků je patrné, že řízením pomocí různých prioritních pravidel lze dosáhnout určitých zlepšení výsledků, nicméně nevhodně zvolené pravidlo může mít za následek i výrazné zhoršení výsledků. Pokud přehlédneme pravidla, u kterých nedošlo ani u jedné ze sledovaných účelových funkcí ke změně výsledku, tak pouze u jediného pravidla nedošlo u žádné účelové funkce ke zhoršení výsledku – nejméně zbývajících operací k provedení – a tím se toto pravidlo stává pomyslným vítězem této části měření. Naproti tomu u pěti prioritních pravidel došlo ke zhoršení výsledků všech sledovaných účelových funkcí.

Prioritní pravidla tak určitě mají své opodstatnění, nicméně je nutné tyto pravidla volit s rozvahou a určitým povědomím o možnostech, které nabízejí.

6.2 Optimalizace pomocí optimalizačních algoritmů – část 1.

Optimalizace modelu lisovny pomocí optimalizačních algoritmů probíhala stejným způsobem jako optimalizace teoretických modelů výroby (pět měření pomocí každého algoritmu) s tím rozdílem, že oproti teoretickým modelům výroby byly u modelu lisovny sledovány výsledky pěti účelových funkcí (celková průběžná doba výroby, střední celková průběžná doba výroby, střední doba čekání, suma všech zpoždění, vytížení strojů).

6.2.1 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloze IV. V následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřených hodnot a v jednotlivých sloupcích jsou uvedeny tyto údaje:

1. Průměrný výsledek optimalizace
2. Průměrná doba optimalizace
3. Průměrné pořadí iterace, při které byl nalezen výsledek
4. Zlepšení vůči neoptimalizovanému modelu

Tab. 6.2: Průměrné hodnoty - celková průběžná doba výroby

Výsledek neoptimalizovaného modelu [d:hh:mm:ss]: 6:15:42:06

Použitý algoritmus	1. [d:hh:mm:ss]	2. [mm:ss]	3. [-]	4. [%]
Metoda náhodného prohledávání	6:13:15:46	05:28	72	1,5
Metoda hladového prohledávání	6:13:15:46	05:47	23	1,5
Metoda simulovaného žíhání	6:13:15:46	05:46	88	1,5
Metoda zakázaného prohledávání	6:13:15:46	05:18	131	1,5
Genetický algoritmus	6:13:15:46	06:36	55	1,5

Tab. 6.3: Průměrné hodnoty - střední celková průběžná doba výroby

Výsledek neoptimalizovaného modelu [d:hh:mm:ss]: 2:10:17:33

Použitý algoritmus	1. [d:hh:mm:ss]	2. [mm:ss]	3. [-]	4. [%]
Metoda náhodného prohledávání	2:01:34:38	05:30	5 725	15,0
Metoda hladového prohledávání	1:23:28:49	05:45	9 596	18,5
Metoda simulovaného žíhání	1:23:10:49	05:28	8 018	19,1
Metoda zakázaného prohledávání	1:23:28:05	05:16	5 196	18,6
Genetický algoritmus	2:00:28:18	07:05	8 318	16,8

Tab. 6.4: Průměrné hodnoty - střední doba čekání

Výsledek neoptimalizovaného modelu [hh:mm:ss]: 21:31:53

Použitý algoritmus	1. [hh:mm:ss]	2. [mm:ss]	3. [-]	4. [%]
Metoda náhodného prohledávání	13:07:27	05:31	4 312	39,0
Metoda hladového prohledávání	11:04:21	05:45	9 685	48,6
Metoda simulovaného žíhání	10:50:22	05:28	6 251	49,7
Metoda zakázaného prohledávání	11:05:19	05:13	8 586	48,5
Genetický algoritmus	12:13:23	07:03	8 105	43,2

Tab. 6.5: Průměrné hodnoty - suma všech zpoždění

Výsledek neoptimalizovaného modelu [d:hh:mm:ss]: 10:22:29:12

Použitý algoritmus	1. [d:hh:mm:ss]	2. [mm:ss]	3. [-]	4. [%]
Metoda náhodného prohledávání	10:20:30:20	05:28	1 719	0,8
Metoda hladového prohledávání	8:22:10:58	05:26	9 791	18,4
Metoda simulovaného žíhání	8:19:11:31	04:57	6 071	19,5
Metoda zakázaného prohledávání	8:22:09:46	04:35	5 725	18,4
Genetický algoritmus	9:15:20:17	07:01	8 144	11,9

Tab. 6.6: Průměrné hodnoty - vytížení strojů

Výsledek neoptimalizovaného modelu: 41,56 %

Použitý algoritmus	1. [s]	2. [mm:ss]	3. [-]	4. [%]
Metoda náhodného prohledávání	42,38	05:30	7 432	1,97
Metoda hladového prohledávání	42,47	05:59	9 603	2,19
Metoda simulovaného žíhání	42,38	05:58	5 914	1,96
Metoda zakázaného prohledávání	42,46	05:42	4 376	2,18
Genetický algoritmus	42,39	07:01	7 537	1,99

6.2.2 Zhodnocení dosažených výsledků

V tab. 6.8 jsou bodově ohodnoceny jednotlivé optimalizační algoritmy. Bodovány byly dva stejné parametry, jako u teoretických modelů výroby a jeden jiný:

1. zlepšení vůči neoptimalizovanému modelu
2. doba simulace
3. pořadí iterace, při které byl nalezen výsledek

Bodování je u druhého a třetího parametru shodné s bodováním teoretických modelů výroby, u prvního parametru je bodování následující:

Tab. 6.7: Bodování optimalizačních algoritmů

počet bodů	zlepšení [%]
1 bod	0 – 5
2 body	5,1 – 10
3 body	10,1 – 15
4 body	15,1 – 20
5 bodů	20,1 a více

Váha jednotlivých parametrů je shodná s váhou u teoretických modelů výroby (60:30:10). Maximální počet dosažených bodů je v tomto případě 25.

Ve sloupcích A – E následující tabulky jsou uvedeny účelové funkce, jež byly jednotlivými optimalizačními algoritmy optimalizovány:

- A. Celková průběžná doba výroby
- B. Střední celková průběžná doba výroby
- C. Střední doba čekání
- D. Suma všech zpoždění
- E. Vytížení strojů

Tab. 6.8: Počet dosažených bodů

	Algoritmus	A	B	C	D	E
zlepšení	Metoda náhodného prohledávání	1	3	5	1	1
	Metoda hladového prohledávání	1	4	5	4	1
	Metoda simulovaného žíhání	1	4	5	4	1
	Metoda zakázaného prohledávání	1	4	5	4	1
	Genetický algoritmus	1	4	5	3	1
doba optimalizace	Metoda náhodného prohledávání	4	4	4	4	4
	Metoda hladového prohledávání	4	4	4	4	4
	Metoda simulovaného žíhání	4	4	4	4	4
	Metoda zakázaného prohledávání	4	4	4	4	4
	Genetický algoritmus	3	3	3	3	3
pořadí iterace	Metoda náhodného prohledávání	5	3	3	5	2
	Metoda hladového prohledávání	5	1	1	1	1
	Metoda simulovaného žíhání	5	1	2	2	3
	Metoda zakázaného prohledávání	5	3	1	3	3
	Genetický algoritmus	5	1	1	1	2

Tab. 6.9: Celkový počet dosažených bodů

Algoritmus	Body celkem			přepočet podle váhy			výsledek
	60%	30%	10%				
Metoda náhodného prohledávání	11	20	18	6,6	6,0	1,8	14,4
Metoda hladového prohledávání	15	20	9	9,0	6,0	0,9	15,9
Metoda simulovaného žíhání	15	20	13	9,0	6,0	1,3	16,3
Metoda zakázaného prohledávání	15	20	15	9,0	6,0	1,5	16,5
Genetický algoritmus	14	15	10	8,4	4,5	1,0	13,9

Podle uvedeného bodování se nejlepší metodou stala metoda zakázaného prohledávání. Z maximálního dosažitelného počtu bodů (25) získala 16,5 bodu. Naopak nejhoršího výsledku dosáhl genetický algoritmus se ziskem 13,9 bodů.

6.3 Optimalizace pomocí optimalizačních algoritmů – část 2.

Cílem tohoto měření bylo poukázat na jednu z nevýhod optimalizačních algoritmů – optimalizace může poskytnout několik stejných výsledků (nejlepších řešení), avšak až na obsluhu je výběr toho správného ze všech správných výsledků. Pro dokázání této nevýhody bylo nutné sledovat výsledky všech použitých účelových funkcí současně (tzn., že při optimalizaci podle jedné účelové funkce měly ostatní účelové funkce také nějaký výsledek, který byl zaznamenán). Dohromady byl model lisovny optimalizován podle tří zvolených účelových funkcí:

1. střední celková průběžná doba výroby
2. suma všech zpoždění
3. celková průběžná doba výroby

Pro tuto část práce byla zvolena metoda zakázaného prohledávání, jelikož v předešlém měření poskytla nejlepší výsledky.

6.3.1 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách a v jednotlivých sloupcích jsou uvedeny tyto údaje (tučně zvýrazněny jsou výsledky té funkce, podle které bylo zrovna optimalizováno):

1. výsledek účelové funkce „celková průběžná doba výroby“
2. výsledek účelové funkce „střední celková průběžná doba výroby“
3. výsledek účelové funkce „střední doba čekání“
4. výsledek účelové funkce „suma všech zpoždění“
5. výsledek účelové funkce „vytížení strojů“

Tab. 6.10: Výsledky optimalizace podle střední celkové průběžné doby výroby

Měření	1. [d:hh:mm:ss]	2. [d:hh:mm:ss]	3. [d:hh:mm:ss]	4. [d:hh:mm:ss]	5. [%]
1.	8:01:38:08	1:23:21:15	0:10:56:00	14:04:56:57	34,0
2.	8:15:12:56	1:23:25:06	0:10:59:51	13:05:21:24	31,7
3.	7:23:38:08	1:23:28:48	0:11:03:33	12:17:18:18	34,4
4.	8:01:38:08	1:23:38:32	0:11:13:17	14:00:48:34	34,0
5.	8:13:12:56	1:23:42:05	0:11:16:50	13:08:34:19	32,0

Tab. 6.11: Výsledky optimalizace podle sumy všech zpoždění

Měření	1. [d:hh:mm:ss]	2. [d:hh:mm:ss]	3. [d:hh:mm:ss]	4. [d:hh:mm:ss]	5. [%]
1.	6:13:15:46	2:07:34:55	0:18:39:02	8:19:11:27	42,3
2.	6:13:15:46	2:06:40:13	0:17:54:32	8:22:34:01	42,3
3.	6:13:15:46	2:07:34:46	0:18:38:52	8:21:44:47	42,3
4.	6:13:15:46	2:07:21:30	0:18:15:24	8:20:34:01	42,3
5.	6:13:15:46	2:05:57:41	0:17:01:48	8:22:34:01	42,3

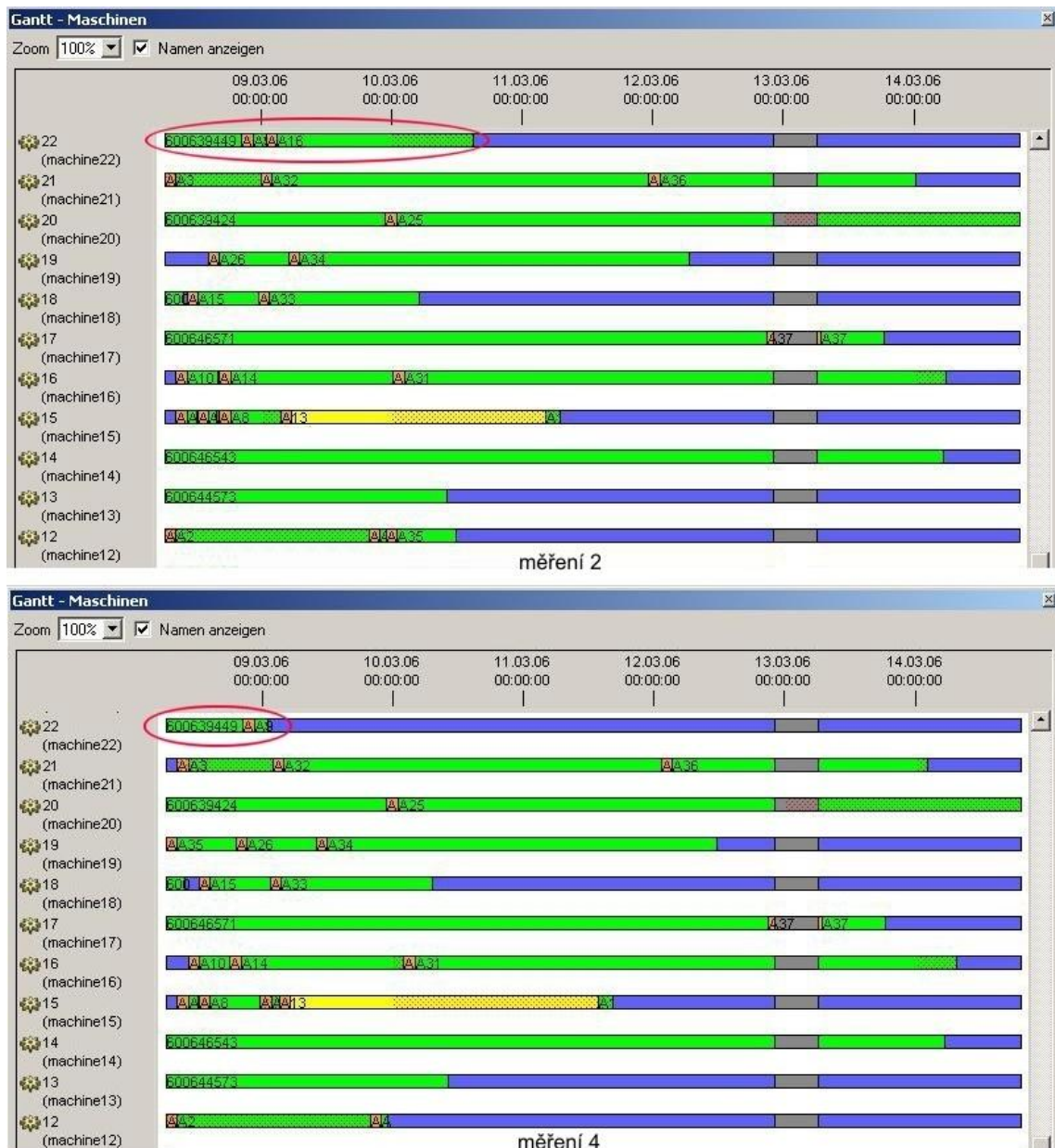
Tab. 6.12: Výsledky optimalizace podle celkové průběžné doby výroby

Měření	1. [d:hh:mm:ss]	2. [d:hh:mm:ss]	3. [d:hh:mm:ss]	4. [d:hh:mm:ss]	5. [%]
1.	6:13:15:46	2:09:13:02	0:20:27:22	13:04:34:52	42,3
2.	6:13:15:46	2:08:47:01	0:20:01:21	11:00:19:31	42,3
3.	6:13:15:46	2:12:04:01	0:23:08:08	15:15:18:12	42,3
4.	6:13:15:46	2:13:19:09	1:00:13:03	11:13:06:02	42,3
5.	6:13:15:46	2:12:22:55	0:23:27:02	10:09:46:11	42,3

Nevýhoda zmiňovaná v úvodu tohoto měření je patrná z tab. 6.12. Optimalizací podle celkové průběžné doby výroby bylo dosaženo ve všech pěti pokusech stejného výsledku této účelové funkce, avšak ostatní účelové funkce mají výsledek pokaždé jiný. Je proto nutné ze všech pěti správných řešení vybrat to „nejlepší“.

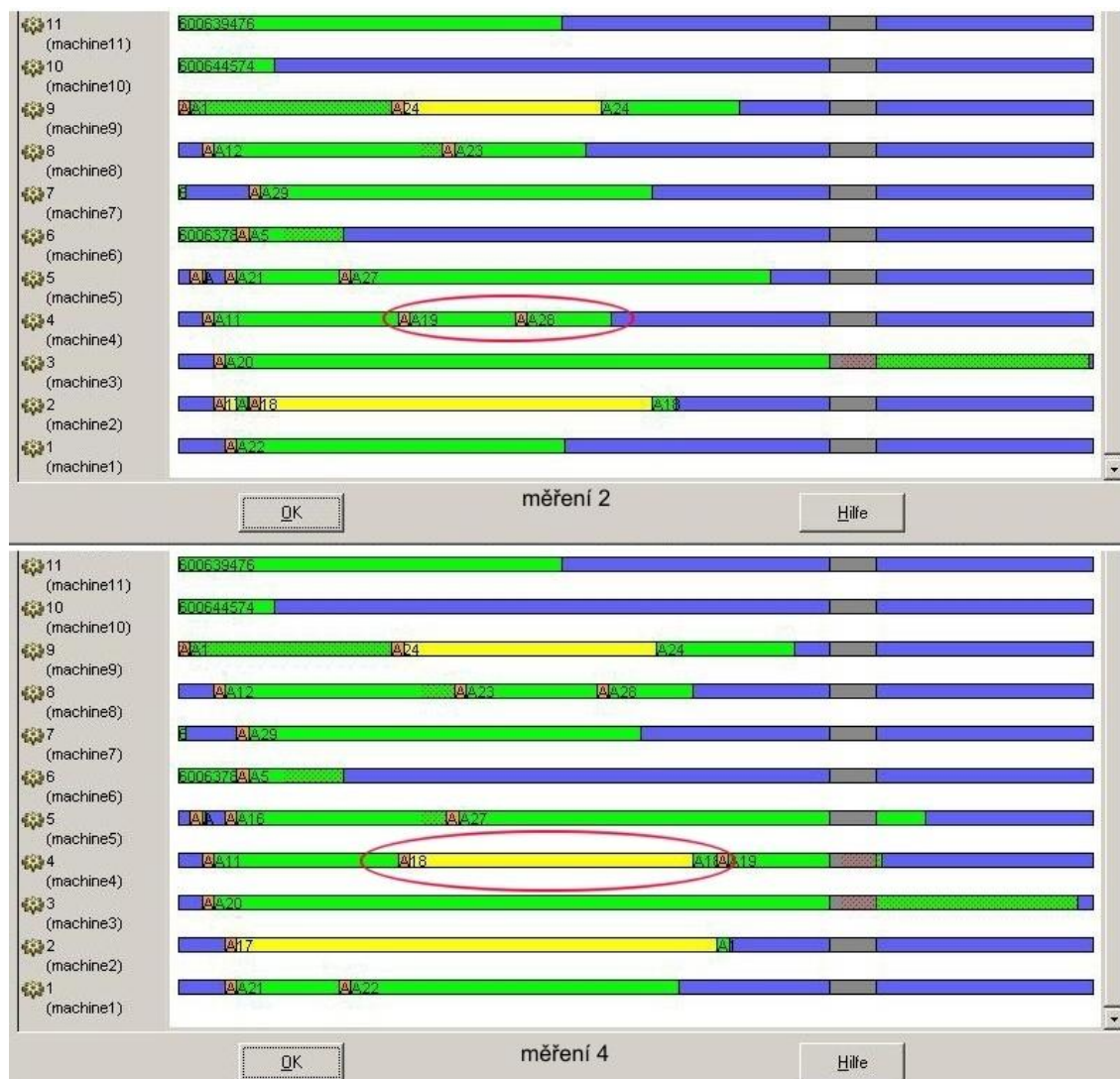
Zároveň je tato nevýhoda zřejmá z následujících dvou obrázků (Obr. 6.1, Obr. 6.2), na kterých jsou znázorněny Ganttovy diagramy měření dva a čtyři, zaznamenané při optimalizaci podle celkové průběžné doby výroby.

Tyto diagramy znázorňují využití jednotlivých pracovišť během pracovního cyklu. Vodorovná osa znázorňuje celkovou průběžnou dobu jednoho pracovního cyklu, svislá osa znázorňuje jednotlivá pracoviště. Na obou obrázcích můžeme pozorovat stejný termín dokončení pracovního cyklu, avšak obsazení strojů a čekání na jednotlivých pracovištích je různé.



Obr. 6.1: Využití pracovišť 12 – 22

Nejvíce zřetelným rozdílem na tomto obrázku je využití pracoviště 22.



Obr. 6.2: Využití pracovišť 1 – 11

Na tomto obrázku je nejviditelnějším rozdílem čekání na pracovišti 4.

Vysvětlivky k Obr. 6.1 a Obr. 6.2:



Během měření se projevila i další nevýhoda optimalizačních algoritmů. Při optimalizaci podle střední celkové průběžné doby výroby a podle sumy všech zpoždění vyšel v každém měření jiný výsledek dané účelové funkce. Z toho je zřejmé, že optimalizační algoritmy nemusí vždy poskytnout nejlepší možné řešení.

6.3.2 Zhodnocení dosažených výsledků

K hodnocení výsledků optimalizace podle různých účelových funkcí použijeme tabulku průměrných hodnot naměřených výsledků:

Tab. 6.13: Průměrné hodnoty při optimalizaci podle různých účelových funkcí

Optimalizováno podle \ Sledované funkce	celková průb. doba [d:hh:mm:ss]	stř. celková průb. doba [d:hh:mm:ss]	střední doba čekání [d:hh:mm:ss]	suma všech zpoždění [d:hh:mm:ss]	vytížení strojů [%]
neoptimal. model	6:15:42:06	2:10:17:33	0:21:31:53	10:22:29:12	41,6
stř. celková průb. doba	8:06:16:03	1:23:31:09	0:11:05:54	13:12:11:54	33,2
suma všech zpoždění	6:13:15:46	2:07:01:49	0:18:05:56	8:21:52:59	42,3
celková průb. doba	6:13:15:46	2:11:09:14	0:22:15:23	12:08:36:58	42,3

Zelenou barvou jsou v tabulce uvedeny hodnoty zlepšené vůči neoptimalizovanému modelu (6.1.1), červenou barvou jsou uvedeny hodnoty vůči neoptimalizovanému modelu zhoršené.

Z takto barevně upravené tabulky vyplývají tři závěry:

1. Optimalizace podle jednoho parametru může negativně ovlivnit posuzování z hlediska jiného parametru.
2. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při optimalizaci podle sumy všech zpoždění, jelikož byly zlepšeny všechny sledované parametry.
3. Zajímavé výsledky ovšem získáme i při optimalizaci podle střední celkové průběžné doby výroby, kde obě zlepšení jsou velmi výrazného charakteru.

7 Zhodnocení využitelnosti optimalizačních metod

Z naměřených hodnot modelu lisovny a teoretických modelů výroby plynou rozdíly mezi optimalizačními algoritmy a prioritními pravidly:

Prioritní pravidla:

Výhody:

- krátká doba optimalizace
- nenáročné na hardware
- snadné nastavení pravidla

Optimalizační algoritmy:

Nevýhody:

- nižší schopnost dosažení optima
- delší doba optimalizace
- doba optimalizace závislá na výkonu počítače (a velikosti problému)
- složitější nastavení parametrů jednotlivých algoritmů

Z uvedených výhod a nevýhod porovnávaných metod se prioritní pravidla jeví jako správná volba – přijatelný výsledek velmi rychle a s nutností výběru pouze požadovaného pravidla. Při pohledu na výsledky optimalizačních algoritmů však zaujme výrazné zlepšení výsledků oproti prioritním pravidlům. Zlepšení je přitom možné získat v relativně krátkém čase (cca 12 minut), který se s použitím dostatečně výkonného počítače ještě snižuje.

Další zmiňovaná nevýhoda (složitější nastavení parametrů jednotlivých algoritmů) může být eliminována dvěma způsoby:

1. ponecháním přednastavených hodnot jednotlivých parametrů
2. využitím zkušeností s různými nastaveními jednotlivých parametrů

Jelikož schopnost dosahovat optima závisí mj. na nastavení parametrů optimalizačních algoritmů, může dojít při ponechání přednastavených hodnot ke zhoršení této

schopnosti. Nicméně výsledky jsou i přesto dostatečné, téměř okamžitě k dispozici a navíc bez potřeby hlubší znalosti optimalizačních algoritmů.

Další poznatky o optimalizačních metodách plynoucí z provedených měření jsou následující:

- Optimalizační algoritmy nemusí poskytnout optimální výsledek řešeného problému, avšak mohou nabídnout řešení lepší než IS (viz kapitoly 5.1.2, 5.1.3 a 6.2.1).
- Rozdíly ve výsledcích při použití různých optimalizačních algoritmů jsou minimální, proto je složité určit konkrétní algoritmus jako nejlepší (viz kapitoly 5.2 a 6.2.2).
- Problémem u optimalizačních algoritmů může být výběr vhodného hodnotícího parametru (účelové funkce) pro řešený problém. Volba nevhodného parametru může negativně ovlivnit ostatní hodnotící parametry (viz kapitola 6.3.2).
- Při použití prioritních pravidel může nastat problém s volbou vhodného pravidla. Při použití nevhodného pravidla totiž opět může dojít k negativnímu ovlivnění hodnotících parametrů (viz kapitoly 6.1.1 a 6.1.2).

8 Závěr

Diplomová práce měla za cíl zhodnotit možnosti využití počítačové simulace při rozvrhování dílenských zakázek. K tomuto účelu byly využity jak teoretické příklady, tak i praktický model lisovny.

V úvodních kapitolách byl popsán současný stav v oblasti řízení dílenských zakázek a byly představeny optimalizační algoritmy a možnosti simulačního systému Simcron. V rámci vlastního experimentování byla provedena celá řada simulací, která odhalila jak nedostatky optimalizačních algoritmů, tak i jejich přednosti.

Přínosy plynoucí z použití těchto algoritmů jsou nepřehlédnutelné. Prakticky v reálném čase lze získat řešení blízké optimu řešeného problému. Za hlavní problém, který brání výraznějšímu využívání optimalizačních algoritmů, lze označit zejména volbu hodnotícího parametru (účelové funkce). Riziko nevhodného nastavení optimalizačního kritéria je vhodné minimalizovat pilotním projektem, při kterém se vyzkouší různé algoritmy i různá nastavení optimalizační funkce. Výsledkem může být doporučení „nejlepšího“ nastavení – např. pro naši lisovnu se jako vhodné ukazuje využití metody zakázaného prohledávání v kombinaci s účelovou funkcí „suma všech zpoždění“.

Oblast rozvrhování zakázek skrývá nevyužitý potenciál, jehož využití může znamenat náskok před konkurencí. Výsledky získané v této práci ukázaly na nutnost využívání optimalizačních algoritmů i přes celou řadu problémů, které s jejich využitím souvisejí.

Použitá literatura

- [1] BAKER, Kenneth R. Introduction to Sequencing and Scheduling. 1974. 305 s.
- [2] DUŠÁKOVÁ, Alice, MANLIG, František, VAVRUŠKA, Jan. Podpora rozvrhování výroby pomocí počítačové simulace. Strojírenská technologie: Časopis pro vědu, výzkum a výrobu. 2007, roč. XII, zvláštní číslo, s. 157-160.
- [3] FRENCH, Simon. Sequencing and scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job-Shop. 1982. 245 s. ISBN 0-85312-299-7.
- [4] GREGOR, Milan, et al. Dynamické plánovanie a riadenie výroby. 1. vyd. Žilinská univerzita v Žilině, 2000. 284 s. ISBN 80-7100-607-6.
- [5] KAVAN, Michal. Výrobní a provozní management. 2002. 410 s. ISBN 80-247-0199-5.
- [6] KLUSÁČEK, Dalibor. Plánování úloh v paralelním a distribuovaném prostředí. 2006. 55 s. Masarykova univerzita. Vedoucí diplomové práce Mgr. Hana Rudová, PhD.
- [7] KOBLASA F., DIAS L.S., OLIVEIRA J.A., PEREIRA G. : Heuristic Approach as a way to Improve Scheduling in ERP/APS Systems. Proceedings of 15th European Concurrent Engineering Conference (ECEC2008). Eds. A. Brito and J.M. Teixeira, 47-51, Porto April 2008. EUROSIS-ETI Publication. ISBN 978-9077381-399-7. (All EUROSIS Proceedings are ISI-Thomson and INSPEC referenced).
- [8] KOBLASA, František. Uplatnění optimalizačních metod v dílenském rozvrhování výrobních zakázek. In Výrobní systémy dnes a zítra 2008. 2009.
- [9] KODĚROVÁ, Lucie. Heuristiky. 2008. 45 s. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Jaroslav Marek, PhD.
- [10] KOŠTURIÁK, Ján, GREGOR, Milan. Podnik v roce 2001 : Revoluce v podnikové kultuře. Grada, 1993. 320 s. ISBN 80-7169-003-1.
- [11] LAŽANSKÝ, Jiří. Podklady k přednáškám z předmětu X33SDU [online]. CVUT, [2008] [cit. 2009-03-19]. Dostupný z WWW: <<http://labe.felk.cvut.cz/vyuka/X33SDU/>>.
- [12] MAJER, Petr. Moderní metody rozvrhování výroby. 2003. 90 s. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí dizertační práce RNDr. Jiří Dvořák, CSc. Dostupný z WWW: <majer.czweb.org/scheduling/>.
- [13] MAŠÍN, Ivan. Výroba velkého sortimentu v malých sériích: Principy výrobních systémů pro 21. století. 1. vyd. Institut technologií a managementu, 2004. 101s. ISBN 80-903533-0-4.

-
- [14] MITSUO, Gen, RUNWEI, Cheng. Genetic algorithms and engineering design. 1997. 411 s. ISBN 0-471-12741-8.
- [15] PANWALKAR,, S. S., ISKANDER, Wafik. A Survey of Scheduling Rules. OPERATIONS RESEARCH. 1977, no. 1, s. 45-61.
- [16] POSPÍCHAL, Jiří. Www prednášky o evolučních algoritmech [online]. 2007 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW: <http://www2.fiit.stuba.sk/~pospichal/prednaskaEA_STU.htm>.
- [17] RUDOVÁ, Hana. Učební materiály k předmětu PA167 Rozvrhování [online]. 2008 [cit. 2009-03-29]. Dostupný z WWW: <http://www.fi.muni.cz/~hanka/rozvrhovani_2008/prusvitky/index.html>.
- [18] TOMEK, Gustav, VÁVROVÁ, Věra. Řízení výroby. 1. vyd. Grada Publishing, 1999. 440 s. ISBN 80-7169-578-5.
- [19] TVRDÍK, Josef. Evoluční algoritmy. 2004. 73 s.
- [20] VAVRUŠKA, Jan. Problémy plánování a řízení výroby v omezených kapacitách a prostředí malých a středních podniků. Strojírenská technologie: Časopis pro vědu, výzkum a výrobu. 2007, roč. XII, zvláštní číslo, s. 252-255.
- [21] VAVRUŠKA, Jan. Rozvrhování výroby na úrovni supervisora. In Výrobní systémy dnes a zítra. 2008. s. 10. ISBN 978-80-7372-295-1.
- [22] VEGNEROVÁ, Petra. Operativní plánování a řízení výroby s využitím simulací. In Logistika v teorii a praxi. 1. vyd. Technická univerzita v Liberci, 2004. s. 164-168. ISBN 80-7083-813-2.
- [23] WATSON, Jean-Paul. Empirical Modeling and Analysis of Local Search Algorithms for the Job-Shop Scheduling Problem. 2003. 295 s. Dizertační práce.
- [24] ZELINKA, Ivan. Umělá inteligence v problémech globální optimalizace. 1. vyd. BEN - technická literatura, 2002. 192 s. ISBN 80-7300-069-5.
- [25] APS. IPA Slovakia [online]. 2009 [cit. 2009-04-29]. Dostupný z WWW: <http://ipaslovakia.sk/slovník_view.aspx?id_s=222>.
- [26] ČVUT FEL VT SZZ [online]. [2004] [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://og2.aspweb.cz/Statnice/sw.aspx?Category=24>>.
- [27] Genetický algoritmus. Wikipedie : Otevřená encyklopedie [online]. 2009 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Genetický_algoritmus>.
- [28] Hladový algoritmus. Wikipedie : Otevřená encyklopedie [online]. 2009 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hladový_algoritmus>.
-

- [29] MRP III. IPA Slovakia [online]. 2009 [cit. 2009-04-29]. Dostupný z WWW:
<http://ipaslovakia.sk/slovník_view.aspx?id_s=221>.
- [30] Optimalizační algoritmy [online]. [2006] [cit. 2009-02-12]. Dostupný z WWW:
<http://alife.fei.tuke.sk/projekty/gen_alg/index.html>.
- [31] Návod systému Simcron.

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 2.1: Model výroby typu Open shop	16
Obr. 2.2: Model výroby typu Flow shop	17
Obr. 2.3: Model výroby typu Job shop	18
Obr. 2.4: Rozdělení rozvrhů [1]	18
Obr. 2.5: Porovnání neaktivního a semiaktivního rozvrhu [8]	19
Obr. 2.6: Porovnání semiaktivního a aktivního rozvrhu [8]	20
Obr. 2.7: Porovnání aktivního rozvrhu a rozvrhu bez zpoždění [8]	21
Obr. 3.1: Možné uspořádání optimalizačních algoritmů [30]	22
Obr. 4.1: Ganttův diagram - průběžná doba výroby [31]	30
Obr. 5.1: Model příkladu ft06	34
Obr. 6.1: Využití pracovišť 12 – 22	53
Obr. 6.2: Využití pracovišť 1 – 11	54
Tab. 5.1: Známá optima teoretických modelů výroby	33
Tab. 5.2: Dosažené výsledky při řízení zakázek prioritním pravidlem	35
Tab. 5.3: Průměrné hodnoty - model ft06 - rozvrh bez zpoždění	36
Tab. 5.4: Průměrné hodnoty - model ft10 - rozvrh bez zpoždění	36
Tab. 5.5: Průměrné hodnoty - model ft20 - rozvrh bez zpoždění	36
Tab. 5.6: Průměrné hodnoty - model la02 - rozvrh bez zpoždění	36
Tab. 5.7: Průměrné hodnoty - model la19 - rozvrh bez zpoždění	37
Tab. 5.8: Průměrné hodnoty - model la21 - rozvrh bez zpoždění	37
Tab. 5.9: Průměrné hodnoty - model la27 - rozvrh bez zpoždění	37
Tab. 5.10: Průměrné hodnoty - model la30 - rozvrh bez zpoždění	37
Tab. 5.11: Průměrné hodnoty - model la40 - rozvrh bez zpoždění	38
Tab. 5.12: Průměrné hodnoty - model sw11 - rozvrh bez zpoždění	38
Tab. 5.13: Dosažené výsledky při řízení zakázek prioritním pravidlem	39
Tab. 5.14: Průměrné hodnoty - model ft06 - aktivní rozvrh	39
Tab. 5.15: Průměrné hodnoty - model ft10 - aktivní rozvrh	40
Tab. 5.16: Průměrné hodnoty - model ft20 - aktivní rozvrh	40
Tab. 5.17: Průměrné hodnoty - model la02 - aktivní rozvrh	40
Tab. 5.18: Průměrné hodnoty - model la19 - aktivní rozvrh	40
Tab. 5.19: Průměrné hodnoty - model la21 - aktivní rozvrh	41
Tab. 5.20: Průměrné hodnoty - model la27 - aktivní rozvrh	41
Tab. 5.21: Průměrné hodnoty - model la30 - aktivní rozvrh	41
Tab. 5.22: Průměrné hodnoty - model la40 - aktivní rozvrh	41
Tab. 5.23: Průměrné hodnoty - model sw11 - aktivní rozvrh	42
Tab. 5.24: Bodování optimalizačních algoritmů	42
Tab. 5.25: Počet dosažených bodů	43
Tab. 5.26: Celkový počet dosažených bodů	44

Tab. 6.1: Výsledky účelových funkcí při řízení prioritními pravidly	46
Tab. 6.2: Průměrné hodnoty - celková průběžná doba výroby	48
Tab. 6.3: Průměrné hodnoty - střední celková průběžná doba výroby	48
Tab. 6.4: Průměrné hodnoty - střední doba čekání	48
Tab. 6.5: Průměrné hodnoty - suma všech zpoždění	49
Tab. 6.6: Průměrné hodnoty - vytížení strojů	49
Tab. 6.7: Bodování optimalizačních algoritmů	49
Tab. 6.8: Počet dosažených bodů.....	50
Tab. 6.9: Celkový počet dosažených bodů	50
Tab. 6.10: Výsledky optimalizace podle střední celkové průběžné doby výroby	51
Tab. 6.11: Výsledky optimalizace podle sumy všech zpoždění	52
Tab. 6.12: Výsledky optimalizace podle celkové průběžné doby výroby	52
Tab. 6.13: Průměrné hodnoty při optimalizaci podle různých účelových funkcí.....	55

Seznam příloh

Příloha I: Zadání teoretických modelů výroby.....	I
Příloha II: Teoretické modely – naměřené hodnoty (rozvrh bez zpoždění).....	VI
Příloha III: Teoretické modely – naměřené hodnoty (aktivní rozvrh).....	X
Příloha IV: Model lisovny – naměřené hodnoty	XIV

Příloha I: Zadání teoretických modelů výroby

Příklad ft06 (6×6)											
2	1	0	3	1	6	3	7	5	3	4	6
1	8	2	5	4	10	5	10	0	10	3	4
2	5	3	4	5	8	0	9	1	1	4	7
1	5	0	5	2	5	3	3	4	8	5	9
2	9	1	3	4	5	5	4	0	3	3	1
1	3	3	3	5	9	0	10	4	4	2	1

Příklad ft10 (10×10)																			
0	29	1	78	2	9	3	36	4	49	5	11	6	62	7	56	8	44	9	21
0	43	2	90	4	75	9	11	3	69	1	28	6	46	5	46	7	72	8	30
1	91	0	85	3	39	2	74	8	90	5	10	7	12	6	89	9	45	4	33
1	81	2	95	0	71	4	99	6	9	8	52	7	85	3	98	9	22	5	43
2	14	0	6	1	22	5	61	3	26	4	69	8	21	7	49	9	72	6	53
2	84	1	2	5	52	3	95	8	48	9	72	0	47	6	65	4	6	7	25
1	46	0	37	3	61	2	13	6	32	5	21	9	32	8	89	7	30	4	55
2	31	0	86	1	46	5	74	4	32	6	88	8	19	9	48	7	36	3	79
0	76	1	69	3	76	5	51	2	85	9	11	6	40	7	89	4	26	8	74
1	85	0	13	2	61	6	7	8	64	9	76	5	47	3	52	4	90	7	45

Příklad ft20 (20×5)									
0	29	1	9	2	49	3	62	4	44
0	43	1	75	3	69	2	46	4	72
1	91	0	39	2	90	4	12	3	45
1	81	0	71	4	9	2	85	3	22
2	14	1	22	0	26	3	21	4	72
2	84	1	52	4	48	0	47	3	6
1	46	0	61	2	32	3	32	4	30
2	31	1	46	0	32	3	19	4	36
0	76	3	76	2	85	1	40	4	26
1	85	2	61	0	64	3	47	4	90
1	78	3	36	0	11	4	56	2	21
2	90	0	11	1	28	3	46	4	30
0	85	2	74	1	10	3	89	4	33
2	95	0	99	1	52	3	98	4	43
0	6	1	61	4	69	2	49	3	53
1	2	0	95	3	72	4	65	2	25
0	37	2	13	1	21	3	89	4	55
0	86	1	74	4	88	2	48	3	79
1	69	2	51	0	11	3	89	4	74
0	13	1	7	2	76	3	52	4	45

Příklad Ia02 (10×5)										
0	20	3	87	1	31	4	76	2	17	
4	25	2	32	0	24	1	18	3	81	
1	72	2	23	4	28	0	58	3	99	
2	86	1	76	4	97	0	45	3	90	
4	27	0	42	3	48	2	17	1	46	
1	67	0	98	4	48	3	27	2	62	
4	28	1	12	3	19	0	80	2	50	
1	63	0	94	2	98	3	50	4	80	
4	14	0	75	2	50	1	41	3	55	
4	72	2	18	1	37	3	79	0	61	

Příklad Ia19 (10×10)																			
2	44	3	5	5	58	4	97	0	9	7	84	8	77	9	96	1	58	6	89
4	15	7	31	1	87	8	57	0	77	3	85	2	81	5	39	9	73	6	21
9	82	6	22	4	10	3	70	1	49	0	40	8	34	2	48	7	80	5	71
1	91	2	17	7	62	5	75	8	47	4	11	3	7	6	72	9	35	0	55
6	71	1	90	3	75	0	64	2	94	8	15	4	12	7	67	9	20	5	50
7	70	5	93	8	77	2	29	4	58	6	93	3	68	1	57	9	7	0	52
6	87	1	63	4	26	5	6	2	82	3	27	7	56	8	48	9	36	0	95
0	36	5	15	8	41	9	78	3	76	6	84	4	30	7	76	2	36	1	8
5	88	2	81	3	13	6	82	4	54	7	13	8	29	9	40	1	78	0	75
9	88	4	54	6	64	7	32	0	52	2	6	8	54	5	82	3	6	1	26

Příklad Ia21 (15×10)																			
2	34	3	55	5	95	9	16	4	21	6	71	0	53	8	52	1	21	7	26
3	39	2	31	0	12	1	42	9	79	8	77	6	77	5	98	4	55	7	66
1	19	0	83	3	34	4	92	6	54	9	79	8	62	5	37	2	64	7	43
4	60	2	87	8	24	5	77	3	69	7	38	1	87	6	41	9	83	0	93
8	79	9	77	2	98	4	96	3	17	0	44	7	43	6	75	1	49	5	25
8	35	7	95	6	9	9	10	2	35	1	7	5	28	4	61	0	95	3	76
4	28	5	59	3	16	9	43	0	46	8	50	6	52	7	27	2	59	1	91
5	9	4	20	2	39	6	54	1	45	7	71	0	87	3	41	9	43	8	14
1	28	5	33	0	78	3	26	2	37	7	8	8	66	6	89	9	42	4	33
2	94	5	84	6	78	9	81	1	74	3	27	8	69	0	69	7	45	4	96
1	31	4	24	0	20	2	17	9	25	8	81	5	76	3	87	7	32	6	18
5	28	9	97	0	58	4	45	6	76	3	99	2	23	1	72	8	90	7	86
5	27	9	48	8	27	7	62	4	98	6	67	3	48	0	42	1	46	2	17
1	12	8	50	0	80	2	50	9	80	3	19	5	28	6	63	4	94	7	98
4	61	3	55	6	37	5	14	2	50	8	79	1	41	9	72	7	18	0	75

Příklad Ia27 (20×10)																			
3	60	4	48	5	95	0	87	1	72	9	5	8	35	7	39	6	54	2	66
7	37	6	34	0	97	5	55	2	21	3	20	4	59	9	46	8	19	1	46
4	45	2	73	1	24	8	28	0	28	3	25	5	23	7	83	9	5	6	78
0	53	2	12	9	12	1	37	8	33	3	71	6	55	5	29	7	87	4	38
4	90	2	49	9	27	7	65	5	7	6	23	0	48	3	83	8	17	1	40
3	85	4	25	2	84	6	64	9	13	1	66	7	46	8	59	0	62	5	19
5	88	6	67	4	14	0	41	1	73	7	57	2	53	3	80	9	47	8	74
1	78	5	64	4	63	6	46	3	84	0	84	8	28	9	52	7	26	2	41
1	11	0	64	6	97	9	38	2	17	4	85	5	73	3	10	8	95	7	67
3	93	2	95	7	43	1	65	8	32	0	59	6	85	5	46	9	85	4	60
2	61	3	41	5	49	4	23	0	66	7	49	8	70	9	99	1	90	6	17
4	13	7	7	1	98	8	57	0	73	3	73	2	68	5	40	9	98	6	9
9	86	6	76	4	14	3	41	1	85	0	37	8	19	2	17	7	54	5	79
1	40	2	53	7	97	5	87	8	96	4	84	3	16	6	66	9	52	0	95
6	33	1	33	3	87	0	18	2	55	8	13	4	77	7	60	9	42	5	74
7	92	5	91	8	79	2	54	4	69	6	79	3	33	1	61	9	39	0	16
6	82	1	41	4	28	5	64	2	78	3	76	7	6	8	49	9	47	0	58
0	52	5	42	8	24	9	91	3	47	6	88	4	91	7	52	2	28	1	35
5	82	2	76	3	86	6	93	4	84	7	38	8	95	9	37	1	21	0	23
9	77	4	8	6	42	7	64	0	70	2	45	8	45	5	28	3	67	1	86

Příklad Ia30 (20×10)																			
6	32	3	16	1	33	8	12	7	70	4	10	9	75	0	82	5	88	2	20
8	39	4	81	3	91	5	56	9	69	1	45	6	59	0	86	2	36	7	68
3	84	2	57	7	41	5	73	4	81	0	88	8	38	9	17	6	83	1	5
4	20	5	6	2	15	8	19	1	30	0	94	6	45	7	17	3	18	9	88
9	24	6	49	5	16	4	11	3	60	7	5	8	63	1	25	2	15	0	45
1	86	8	50	2	77	6	54	9	48	0	93	3	32	7	92	5	45	4	71
5	86	6	90	3	78	9	88	2	57	0	32	7	57	8	86	4	71	1	39
2	59	3	18	9	31	4	41	7	20	5	83	8	65	0	54	6	94	1	69
3	47	4	79	6	76	0	59	1	72	2	8	9	30	5	73	7	57	8	84
0	59	2	89	4	10	7	45	3	8	5	54	6	88	8	20	9	7	1	62
5	63	6	9	4	77	3	37	2	5	8	13	9	79	1	24	7	10	0	82
0	74	1	32	2	61	7	53	4	92	9	20	8	10	3	5	6	45	5	23
2	85	9	51	0	61	5	99	4	37	6	94	1	98	8	65	3	33	7	75
0	51	3	24	5	8	6	30	7	12	8	23	2	7	4	17	9	35	1	81
1	71	5	42	8	68	2	31	6	29	3	63	4	65	9	70	7	27	0	93
1	28	5	38	4	51	7	70	2	33	8	78	9	45	3	90	6	54	0	72
0	18	2	90	4	25	6	92	8	85	5	35	7	29	1	81	9	80	3	59
5	67	2	96	1	38	4	86	0	97	3	94	7	86	6	35	9	82	8	45
2	92	8	51	4	59	6	52	5	8	9	70	1	75	3	54	7	60	0	33
3	98	7	80	5	78	0	82	2	7	9	89	1	69	4	51	8	79	6	62

Příklad Ia40 (15×15)																													
9	65	10	28	4	74	12	33	2	51	14	75	5	73	8	32	6	13	3	81	1	35	7	59	13	38	11	55	0	27
0	64	1	53	11	83	2	33	4	6	9	52	14	72	8	7	13	90	12	21	6	23	3	10	10	39	5	49	7	72
14	73	3	82	1	23	12	62	6	88	5	21	8	65	11	70	7	53	10	81	2	93	13	77	0	61	9	28	4	78
1	12	6	51	7	33	4	15	14	72	10	98	9	94	5	12	11	42	2	24	13	15	8	28	3	6	12	99	0	41
12	97	5	7	9	96	4	15	14	73	13	43	0	32	8	22	11	42	1	94	2	23	7	86	6	78	10	24	3	31
1	72	5	88	2	93	13	13	4	44	14	66	6	63	7	14	9	67	10	17	11	85	0	35	3	68	12	5	8	49
9	15	7	82	6	21	14	53	3	72	13	49	2	99	4	26	12	56	8	45	1	68	10	51	0	8	5	27	11	96
3	54	7	24	4	14	8	38	5	36	2	52	14	55	12	37	11	48	0	93	13	60	10	70	1	23	6	23	9	83
3	12	8	69	6	26	9	23	14	28	1	82	5	33	4	45	13	64	7	15	11	9	12	73	10	59	2	37	0	62
0	87	5	12	7	80	4	50	10	48	12	90	1	72	13	24	6	14	8	71	11	44	9	46	2	15	14	61	3	92
2	54	0	22	6	61	4	46	3	73	5	16	12	6	9	94	14	93	13	67	8	54	7	75	11	32	10	40	1	97
10	92	14	36	4	22	9	9	3	47	1	77	12	79	13	36	6	30	8	98	11	79	7	7	5	55	2	6	0	30
0	49	13	83	3	73	6	82	1	82	14	92	11	73	4	31	10	35	9	54	5	7	8	37	7	72	2	52	12	76
10	98	12	34	13	52	4	26	1	28	3	39	8	80	5	29	9	70	0	43	6	48	7	58	2	45	14	94	11	96
1	70	10	17	6	90	12	67	4	14	8	23	3	21	7	18	13	43	11	84	5	26	9	36	2	93	14	84	0	42

Příklad sw11 (50×10)																			
0	92	4	47	3	56	2	91	1	49	5	39	9	63	7	12	6	1	8	37
0	86	2	100	1	75	3	92	4	90	5	11	7	85	8	54	9	100	6	38
1	4	4	94	3	44	2	40	0	92	8	53	6	40	9	5	5	68	7	27
4	87	0	48	1	59	2	92	3	35	6	99	7	46	9	27	8	83	5	91
0	83	1	78	4	76	3	64	2	44	8	12	9	91	6	31	7	98	5	63
3	49	0	15	1	100	4	18	2	24	6	92	9	65	5	26	7	29	8	24
0	28	3	53	4	84	2	47	1	85	7	100	5	34	6	35	8	90	9	88
2	61	4	71	3	54	1	34	0	13	9	47	8	2	6	97	7	27	5	97
0	85	2	75	1	33	4	72	3	49	7	23	5	12	8	90	6	87	9	42
2	24	3	20	1	65	4	33	0	75	9	47	6	84	8	44	7	74	5	29
2	48	3	27	4	1	0	23	1	66	6	35	7	46	9	29	5	63	8	44
2	79	0	4	4	61	3	46	1	69	7	10	8	88	9	19	6	50	5	34
0	16	4	31	3	77	2	3	1	25	8	88	7	97	9	49	6	79	5	22
1	40	0	39	4	15	2	93	3	48	6	63	9	74	8	46	7	91	5	51
4	48	0	93	2	8	3	50	1	5	6	48	7	46	9	35	5	88	8	97
3	70	1	8	2	65	0	32	4	84	8	9	6	43	7	10	5	72	9	60
0	21	2	28	1	26	3	91	4	58	9	90	6	43	8	64	5	39	7	93
1	50	2	60	0	51	4	90	3	93	7	20	9	33	8	27	6	12	5	89
1	21	3	3	2	47	4	34	0	53	9	67	8	8	5	68	7	1	6	71
3	57	4	26	2	36	0	48	1	11	9	44	7	25	5	30	8	92	6	57
1	20	0	20	4	6	3	74	2	48	9	77	8	15	5	80	7	27	6	10
3	71	1	40	0	86	2	23	4	29	7	99	8	56	6	100	9	77	5	28
4	83	0	61	3	27	1	86	2	99	7	31	5	60	8	40	9	84	6	26
4	68	1	94	3	46	2	60	0	33	7	46	5	86	9	63	6	70	8	89
4	33	1	13	2	91	3	27	0	38	8	82	7	31	6	23	9	27	5	87
4	58	3	30	0	24	2	12	1	38	8	2	9	37	5	59	6	37	7	36
2	62	1	47	4	5	3	39	0	75	7	60	9	65	8	61	6	77	5	31
4	100	0	21	1	53	3	74	2	3	8	34	6	6	7	91	9	80	5	28
1	8	0	3	2	88	3	54	4	18	9	4	6	34	5	54	8	59	7	42
3	33	4	72	0	83	2	17	1	23	6	24	8	60	9	96	7	78	5	70
4	63	2	36	3	70	0	97	1	99	6	71	9	92	5	41	8	73	7	97
2	28	1	37	4	24	0	30	3	55	8	38	5	9	9	77	7	17	6	51
3	15	0	46	2	14	4	18	1	99	9	48	6	41	5	10	7	47	8	80
4	89	3	78	2	51	1	63	0	29	7	70	9	7	5	14	8	84	6	32
4	26	1	69	2	92	3	15	0	23	8	42	6	95	5	47	9	83	7	56
1	38	2	44	3	47	4	23	0	10	9	63	7	65	6	21	5	70	8	56
3	42	4	85	1	29	0	35	2	66	9	46	8	25	5	90	7	85	6	75
3	99	0	46	4	74	2	96	1	48	5	52	6	13	7	88	8	4	9	30
1	15	3	80	4	47	2	25	0	8	9	61	7	70	8	23	6	93	5	5
0	90	2	51	3	66	4	5	1	86	5	59	6	97	9	28	7	85	8	9
0	59	1	50	4	40	3	23	2	93	7	61	9	96	8	63	6	34	5	14
1	62	2	72	4	30	0	21	3	15	5	77	6	13	7	2	8	22	9	22
2	20	4	14	3	85	1	4	0	2	9	33	7	90	5	48	8	90	6	62
0	49	3	49	4	46	1	89	2	64	9	72	8	6	5	83	6	13	7	66
4	74	1	55	2	73	0	25	3	16	7	19	9	38	6	22	5	26	8	63
3	13	2	96	1	8	0	15	4	97	6	95	7	2	5	66	8	57	9	46
4	73	1	97	3	39	0	22	2	90	9	64	6	65	8	31	5	98	7	85
3	43	2	67	0	38	1	77	4	11	7	61	5	7	9	95	8	97	6	69
0	35	2	68	1	5	3	46	4	4	7	51	6	44	5	58	9	69	8	98
2	68	1	81	0	2	3	4	4	59	9	53	8	69	5	69	6	14	7	21

Příloha II: Teoretické modely – naměřené hodnoty (rozvrh bez zpoždění)

V jednotlivých sloupcích tabulek jsou uvedeny následující údaje:

- Po – hodnota výsledku po optimalizaci
- čas – doba optimalizace
- iter. – iterace, při které byl nalezen výsledek
- poč – počet prohledaných iterací (pouze u příkladu sw11)

ft06 (6×6) Rozvrh bez zpoždění	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	57	04:45	2560	57	04:34	6780	57	01:21	200
Hladové prohledávání	57	05:43	1163	57	05:38	1454	57	01:38	751
Simulované žíhání	58	06:09	4829	59	05:58	18	57	01:48	4301
Zakázané hledání	57	05:07	706	57	04:51	463	57	01:22	1541
Genetický algoritmus	57	05:12	375	57	04:47	355	57	01:26	161
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	57	01:21	1914	57	01:25	4851			
Hladové prohledávání	57	01:38	472	57	01:39	260			
Simulované žíhání	57	01:52	6104	59	01:48	15			
Zakázané hledání	57	01:22	1433	57	01:21	1317			
Genetický algoritmus	57	01:26	98	57	01:26	231			

ft10 (10×10) Rozvrh bez zpoždění	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1027	07:06	9116	1004	06:57	1643	1013	01:53	9850
Hladové prohledávání	987	08:13	8029	988	08:29	8235	964	02:22	8576
Simulované žíhání	1034	07:33	3752	1007	07:34	4884	1010	02:11	9744
Zakázané hledání	982	07:17	8306	984	06:57	1959	1013	01:55	1886
Genetický algoritmus	1010	08:15	7085	989	08:25	1196	968	02:22	7962
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1002	01:59	800	1015	01:51	6955			
Hladové prohledávání	968	02:29	6521	995	02:20	4512			
Simulované žíhání	997	02:18	9768	1018	02:10	6406			
Zakázané hledání	1001	02:00	1503	1010	01:57	1672			
Genetický algoritmus	968	02:29	9232	984	02:24	7690			

ft20 (20×5) Rozvrh bez zpoždění	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1255	08:45	3185	1226	08:17	1319	1234	02:17	2862
Hladové prohledávání	1185	10:13	9725	1190	10:21	9369	1203	02:52	8717
Simulované žihání	1234	09:24	5244	1213	09:11	8893	1233	02:34	9383
Zakázané hledání	1250	08:41	793	1243	08:43	3546	1232	02:20	726
Genetický algoritmus	1203	11:16	5340	1219	10:52	8627	1185	03:05	8581
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1233	02:20	8074	1250	02:18	4533			
Hladové prohledávání	1195	02:54	9187	1200	02:52	8604			
Simulované žihání	1240	02:35	7653	1233	02:34	8112			
Zakázané hledání	1227	02:20	9305	1226	02:22	5864			
Genetický algoritmus	1190	03:03	7190	1185	03:03	6382			

la02 (10×5) Rozvrh bez zpoždění	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	707	06:07	2686	703	06:10	9364	702	01:33	7521
Hladové prohledávání	685	06:39	4870	672	08:06	6564	675	01:55	8150
Simulované žihání	715	06:28	222	695	06:23	7565	694	01:53	8266
Zakázané hledání	687	05:51	522	694	05:36	6719	694	01:35	521
Genetický algoritmus	675	06:50	7721	685	06:41	3373	687	01:58	5612
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	694	01:33	1760	694	01:32	5521			
Hladové prohledávání	668	01:55	7075	694	01:54	1729			
Simulované žihání	703	01:53	7121	675	01:53	8363			
Zakázané hledání	682	01:34	302	694	01:33	5381			
Genetický algoritmus	676	01:58	7411	676	01:58	8980			

la19 (10×10) Rozvrh bez zpoždění	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	875	06:56	4710	875	06:51	8833	877	01:55	6491
Hladové prohledávání	875	08:26	2022	875	08:36	4328	877	02:23	713
Simulované žihání	875	07:42	8124	880	08:44	5476	880	02:13	8817
Zakázané hledání	877	07:22	9816	875	07:44	1336	876	01:56	2827
Genetický algoritmus	875	08:28	3629	875	08:20	2894	875	02:22	2952
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	875	01:54	727	875	01:54	7029			
Hladové prohledávání	875	02:24	3213	875	02:24	996			
Simulované žihání	877	02:13	5643	880	02:14	8024			
Zakázané hledání	875	01:57	6554	875	01:57	822			
Genetický algoritmus	875	02:22	7194	875	02:22	7566			

Ia21 (15×10) Rozvrh bez zpoždění	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1163	08:25	5135	1159	08:54	6196	1151	02:26	8132
Hladové prohledávání	1112	11:22	9385	1100	11:04	8209	1128	03:07	8947
Simulované žihání	1159	09:06	7787	1140	09:21	9054	1151	02:38	8028
Zakázané hledání	1126	09:04	5286	1147	09:19	9579	1134	02:31	1421
Genetický algoritmus	1132	10:45	8554	1119	10:56	6160	1103	03:06	8784
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1149	02:27	4253	1143	02:28	1208			
Hladové prohledávání	1116	03:08	9416	1129	03:08	9377			
Simulované žihání	1138	02:38	8191	1142	02:37	9706			
Zakázané hledání	1132	02:30	2476	1118	02:31	1060			
Genetický algoritmus	1112	03:05	8865	1123	03:05	5718			

Ia27 (20×10) Rozvrh bez zpoždění	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1392	10:58	4006	1406	11:09	4473	1402	03:26	7649
Hladové prohledávání	1375	13:54	9531	1314	14:45	9859	1340	03:59	8927
Simulované žihání	1355	11:16	8917	1374	11:23	6666	1368	03:11	9879
Zakázané hledání	1382	11:31	8081	1367	11:15	3289	1346	03:11	5216
Genetický algoritmus	1330	13:37	8230	1338	13:03	6369	1336	03:52	9836
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1396	03:27	5265	1381	03:24	1964			
Hladové prohledávání	1315	04:00	9649	1340	03:57	9302			
Simulované žihání	1372	03:11	9972	1390	03:11	6949			
Zakázané hledání	1345	03:10	9460	1339	03:10	7922			
Genetický algoritmus	1334	03:53	7107	1347	03:52	8672			

Ia30 (20×10) Rozvrh bez zpoždění	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1479	11:06	918	1450	11:00	4305	1461	03:15	9690
Hladové prohledávání	1441	14:31	9143	1407	14:07	9587	1433	04:01	9450
Simulované žihání	1447	11:27	3827	1432	11:25	8527	1460	03:12	8578
Zakázané hledání	1400	11:38	2275	1440	11:31	4906	1419	03:09	6754
Genetický algoritmus	1415	13:46	5592	1416	13:48	6702	1380	03:51	6221
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1442	03:12	9987	1446	03:13	4020			
Hladové prohledávání	1404	03:58	9524	1402	03:59	9583			
Simulované žihání	1433	03:12	5257	1433	03:13	8491			
Zakázané hledání	1403	03:09	989	1397	03:08	4466			
Genetický algoritmus	1392	03:52	8375	1408	03:51	8687			

<i>la40 (15×15)</i> <i>Rozvrh bez zpoždění</i>	<i>Měření 1</i>			<i>Měření 2</i>			<i>Měření 3</i>		
	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>
<i>Náhodné prohledávání</i>	1344	11:04	9085	1347	11:04	7371	1337	03:08	5176
<i>Hladové prohledávání</i>	1321	14:33	8410	1278	14:20	9387	1316	04:05	6875
<i>Simulované žihání</i>	1340	11:14	3270	1337	11:25	4856	1330	03:16	8807
<i>Zakázané hledání</i>	1300	11:23	2598	1312	11:36	9168	1319	03:12	6594
<i>Genetický algoritmus</i>	1299	13:18	8994	1310	13:27	2267	1304	03:48	5579
	<i>Měření 4</i>			<i>Měření 5</i>					
<i>Náhodné prohledávání</i>	1320	03:04	5282	1317	03:08	3282			
<i>Hladové prohledávání</i>	1315	04:02	9374	1285	04:00	7900			
<i>Simulované žihání</i>	1338	03:15	7857	1329	03:15	8844			
<i>Zakázané hledání</i>	1315	03:11	1167	1317	03:11	2132			
<i>Genetický algoritmus</i>	1306	04:05	9241	1293	03:48	9437			

<i>sw11 (50×10)</i> <i>bez zpoždění</i>	<i>Měření 1</i>				<i>Měření 3</i>			<i>Měření 4</i>		
	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>poč</i>	<i>iter.</i>	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>
<i>Náhodné pr.</i>	3546	15:00	4946	2737	3543	08:37	5425	3536	08:53	2945
<i>Hladové pr.</i>	3663	15:00	3192	2971	3507	11:41	9809	3484	12:01	8899
<i>Simulované ž.</i>	3496	15:00	4829	4028	3490	08:35	8773	3475	08:23	7312
<i>Zakázané hl.</i>	3411	15:00	4787	1974	3436	09:02	3793	3431	09:02	2604
<i>Genetický a.</i>	3537	15:00	3775	3543	3427	11:12	9311	3499	11:59	6868
	<i>Měření 2</i>				<i>Měření 5</i>					
<i>Náhodné pr.</i>	3495	15:00	4765	4265	3533	08:38	5900			
<i>Hladové pr.</i>	3657	15:00	3171	2192	3538	10:53	9816			
<i>Simulované ž.</i>	3501	15:00	4826	2764	3472	08:23	1750			
<i>Zakázané hl.</i>	3468	15:00	4947	739	3430	09:01	6575			
<i>Genetický a.</i>	3592	15:00	3807	2913	3442	11:11	9183			

Příloha III: Teoretické modely – naměřené hodnoty (aktivní rozvrh)

V jednotlivých sloupcích tabulek jsou uvedeny následující údaje:

- Po – hodnota výsledku po optimalizaci
- čas – doba optimalizace
- iter. – iterace, při které byl nalezen výsledek

ft06 (6×6) aktivní rozvrh	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	60	00:55	7232	61	00:56	2658	58	00:57	1599
Hladové prohledávání	58	01:03	2275	58	01:05	2380	58	01:06	2841
Simulované žihání	63	00:54	1690	59	00:56	698	60	00:55	1432
Zakázané hledání	60	01:08	3427	58	01:08	262	59	01:07	4738
Genetický algoritmus	58	01:07	9027	59	01:08	5832	59	01:06	3110
	Měření 4			Měření 5					
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.			
Náhodné prohledávání	59	00:59	7212	60	00:59	3927			
Hladové prohledávání	58	01:06	4761	55	01:03	5889			
Simulované žihání	63	00:54	5722	60	00:55	6349			
Zakázané hledání	58	01:07	5061	58	01:07	9656			
Genetický algoritmus	59	01:05	3489	58	01:09	1133			

ft10 (10×10) aktivní rozvrh	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1172	02:06	9877	1159	02:06	1242	1156	02:05	7211
Hladové prohledávání	1077	02:37	9436	1112	02:37	9977	1102	02:36	9082
Simulované žihání	1169	02:20	9463	1123	02:23	6636	1139	02:21	6570
Zakázané hledání	1141	02:13	8115	1134	02:16	481	1157	02:14	9772
Genetický algoritmus	1042	02:48	9097	1073	02:50	9070	1068	05:50	9546
	Měření 4			Měření 5					
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.			
Náhodné prohledávání	1143	02:07	6878	1154	02:07	4260			
Hladové prohledávání	1043	02:37	9314	1094	02:36	9676			
Simulované žihání	1160	02:22	9648	1169	02:21	9286			
Zakázané hledání	1161	02:15	9288	1154	02:15	319			
Genetický algoritmus	1048	02:48	9154	1086	02:51	4904			

ft20 (20×5) aktivní rozvrh	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1408	02:33	2174	1394	02:33	5869	1399	02:34	4736
Hladové prohledávání	1303	03:04	9810	1392	03:04	9979	1355	03:02	9710
Simulované žihání	1375	02:42	6134	1381	02:42	8637	1381	02:42	6145
Zakázané hledání	1399	02:29	221	1414	02:31	5199	1403	02:29	8482
Genetický algoritmus	1350	03:07	9841	1339	03:10	7337	1342	03:10	7543
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1391	02:34	3330	1381	02:33	2812			
Hladové prohledávání	1366	03:04	9990	1386	03:05	7025			
Simulované žihání	1370	02:43	3268	1395	02:43	2241			
Zakázané hledání	1396	02:31	549	1389	02:30	164			
Genetický algoritmus	1361	03:10	6296	1338	03:09	9998			

la02 (10×5) aktivní rozvrh	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	761	01:41	2867	722	01:41	6598	777	01:42	2328
Hladové prohledávání	677	02:04	8213	717	02:04	8031	724	02:04	9257
Simulované žihání	737	01:55	9170	751	01:55	8754	738	01:55	8194
Zakázané hledání	767	01:45	850	733	01:44	5337	717	01:44	9628
Genetický algoritmus	720	02:09	9314	685	02:09	7909	699	02:09	9166
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	730	01:43	9690	712	01:41	5188			
Hladové prohledávání	692	02:04	9718	719	02:03	7230			
Simulované žihání	755	01:56	9154	729	01:55	8039			
Zakázané hledání	738	01:43	5420	738	01:44	299			
Genetický algoritmus	704	02:09	7472	709	02:11	6462			

la19 (10×10) aktivní rozvrh	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1004	02:03	9173	994	02:06	9329	1010	02:07	5033
Hladové prohledávání	932	02:36	9568	929	02:35	9995	983	02:36	9438
Simulované žihání	1008	02:20	2736	1008	02:20	5114	992	02:21	9654
Zakázané hledání	976	02:13	533	991	02:14	3176	973	02:13	7568
Genetický algoritmus	931	02:41	4910	947	02:44	5449	925	02:43	8911
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1017	02:09	3920	1003	02:09	9904			
Hladové prohledávání	945	02:34	9152	960	02:34	9250			
Simulované žihání	1011	02:21	8931	987	02:21	4877			
Zakázané hledání	986	02:13	7176	968	02:16	2908			
Genetický algoritmus	972	02:43	8348	924	02:44	9864			

la21 (15×10) aktivní rozvrh	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1382	02:56	1573	1390	02:57	5242	1332	02:59	717
Hladové prohledávání	1307	03:20	9748	1339	03:23	9102	1338	03:14	9249
Simulované žihání	1361	02:52	3413	1373	02:53	6094	1358	02:53	7659
Zakázané hledání	1345	02:54	2609	1334	02:53	3747	1308	02:42	5830
Genetický algoritmus	1301	03:22	6134	1276	03:23	9812	1308	03:24	3791
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1359	02:59	2083	1370	02:54	6018			
Hladové prohledávání	1293	03:22	9578	1261	03:23	9941			
Simulované žihání	1354	02:54	9008	1336	02:55	6908			
Zakázané hledání	1350	02:44	460	1299	02:46	4579			
Genetický algoritmus	1319	03:25	9900	1302	03:26	8021			

la27 (20×10) aktivní rozvrh	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1700	03:23	3540	1651	03:28	4848	1717	03:30	5434
Hladové prohledávání	1624	04:26	9733	1580	04:26	9977	1670	04:27	9665
Simulované žihání	1702	03:43	8806	1672	03:45	9550	1688	03:45	6534
Zakázané hledání	1599	03:24	4466	1663	03:28	5349	1645	03:24	3653
Genetický algoritmus	1579	04:16	8795	1532	04:23	9153	1619	04:23	8578
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1679	03:31	7143	1701	03:29	8335			
Hladové prohledávání	1627	04:29	9574	1605	04:30	8173			
Simulované žihání	1682	03:50	4556	1697	03:51	6168			
Zakázané hledání	1595	03:28	8795	1666	03:31	804			
Genetický algoritmus	1622	04:22	7457	1548	04:23	7416			

la30 (20×10) aktivní rozvrh	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
Náhodné prohledávání	1733	03:29	2258	1743	03:31	7993	1753	03:22	6825
Hladové prohledávání	1685	04:28	9636	1632	04:24	9879	1668	04:27	9880
Simulované žihání	1740	03:43	2929	1686	03:39	9392	1752	03:40	2470
Zakázané hledání	1644	03:25	7279	1651	03:24	9184	1690	03:30	6892
Genetický algoritmus	1656	04:07	7449	1620	04:06	9512	1584	04:15	5144
Měření 4			Měření 5						
Náhodné prohledávání	1650	03:28	1285	1744	03:29	229			
Hladové prohledávání	1707	04:25	9408	1599	04:30	9994			
Simulované žihání	1705	03:42	8788	1758	03:44	1713			
Zakázané hledání	1678	03:34	2147	1650	03:25	5389			
Genetický algoritmus	1660	04:08	8824	1629	04:07	9362			

<i>la40 (15×15)</i> <i>aktivní rozvrh</i>	<i>Měření 1</i>			<i>Měření 2</i>			<i>Měření 3</i>		
	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>
<i>Náhodné prohledávání</i>	1609	03:32	3499	1636	03:32	7544	1582	03:40	2004
<i>Hladové prohledávání</i>	1529	04:21	7938	1578	04:20	7055	1498	04:18	9904
<i>Simulované žihání</i>	1571	03:31	9986	1580	03:32	9524	1575	03:35	3762
<i>Zakázané hledání</i>	1581	03:41	7796	1547	03:45	4421	1532	03:34	7831
<i>Genetický algoritmus</i>	1462	04:16	7138	1460	04:11	9360	1494	04:23	7808
	<i>Měření 4</i>			<i>Měření 5</i>					
<i>Náhodné prohledávání</i>	1627	03:38	6614	1607	03:42	6852			
<i>Hladové prohledávání</i>	1478	04:18	9901	1526	04:19	9765			
<i>Simulované žihání</i>	1581	03:34	9173	1544	03:39	7369			
<i>Zakázané hledání</i>	1529	03:35	2963	1527	03:44	1105			
<i>Genetický algoritmus</i>	1504	04:12	9427	1474	04:10	9224			

<i>sw11 (50×10)</i> <i>aktivní rozvrh</i>	<i>Měření 1</i>			<i>Měření 2</i>			<i>Měření 3</i>		
	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>	<i>Po</i>	<i>čas</i>	<i>iter.</i>
<i>Náhodné prohledávání</i>	4083	08:46	732	4044	09:13	4362	4083	09:35	814
<i>Hladové prohledávání</i>	4247	11:04	9999	4129	11:19	9959	4215	11:22	9749
<i>Simulované žihání</i>	4060	09:20	3035	4037	09:23	1043	4052	08:58	8388
<i>Zakázané hledání</i>	4134	09:04	9405	4057	08:49	5408	4074	09:13	371
<i>Genetický algoritmus</i>	4095	12:11	9737	4131	12:25	8888	4151	12:24	9154
	<i>Měření 4</i>			<i>Měření 5</i>					
<i>Náhodné prohledávání</i>	4083	09:13	2115	4083	09:21	2679			
<i>Hladové prohledávání</i>	4252	11:12	9924	4349	11:29	2497			
<i>Simulované žihání</i>	4083	09:19	2279	4037	08:58	9930			
<i>Zakázané hledání</i>	4083	08:59	1691	4059	08:48	2338			
<i>Genetický algoritmus</i>	4107	12:23	8310	4222	12:33	9998			

Příloha IV: Model lisovny – naměřené hodnoty

V jednotlivých sloupcích tabulek jsou uvedeny následující údaje:

- Po – hodnota výsledku po optimalizaci
- čas – doba optimalizace
- iter. – iterace, při které byl nalezen výsledek

Celková průběžná doba výroby	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
<i>Náhodné prohledávání</i>	566146	05:28	58	566146	05:27	180	566146	05:28	12
<i>Hladové prohledávání</i>	566146	05:51	35	566146	05:44	39	566146	05:46	35
<i>Simulované žíhání</i>	566146	05:44	83	566146	05:46	49	566146	05:44	12
<i>Zakázané hledání</i>	566146	04:59	203	566146	05:27	114	566146	05:22	209
<i>Genetický algoritmus</i>	566146	06:37	8	566146	06:35	34	566146	06:35	12
	Měření 4			Měření 5					
<i>Náhodné prohledávání</i>	566146	05:28	49	566146	05:28	63			
<i>Hladové prohledávání</i>	566146	05:47	6	566146	05:47	2			
<i>Simulované žíhání</i>	566146	05:47	125	566146	05:48	169			
<i>Zakázané hledání</i>	566146	05:10	63	566146	05:30	65			
<i>Genetický algoritmus</i>	566146	06:39	121	566146	06:36	102			

Střední celková průběžná doba výroby	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
<i>Náhodné prohledávání</i>	178616	05:29	6716	179045	05:30	7800	176944	05:30	1122
<i>Hladové prohledávání</i>	171456	05:40	9704	171729	05:45	9392	170342	05:44	9922
<i>Simulované žíhání</i>	169931	05:30	7922	169860	05:32	5969	169762	05:23	9892
<i>Zakázané hledání</i>	170436	05:19	6188	170593	04:59	9355	170985	05:22	3023
<i>Genetický algoritmus</i>	175850	07:03	5844	174853	07:05	8706	174879	07:06	9657
	Měření 4			Měření 5					
<i>Náhodné prohledávání</i>	179682	05:30	9008	178104	05:30	3979			
<i>Hladové prohledávání</i>	170988	05:41	9647	170130	05:53	9317			
<i>Simulované žíhání</i>	169942	05:27	8673	169752	05:29	7635			
<i>Zakázané hledání</i>	170814	05:22	4055	171595	05:16	3358			
<i>Genetický algoritmus</i>	172837	07:03	9132	174070	07:07	8250			

Střední doba čekání	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
<i>Náhodné prohledávání</i>	48435	05:30	4145	46350	05:31	6726	46823	05:31	2664
<i>Hladové prohledávání</i>	39199	05:48	9731	40730	05:46	9257	40976	05:39	9923
<i>Simulované žihání</i>	39492	05:22	9761	38742	05:30	7250	38744	05:31	7680
<i>Zakázané hledání</i>	39364	05:20	7025	42280	05:03	6917	39540	05:08	9268
<i>Genetický algoritmus</i>	42935	07:08	8754	44880	07:04	7549	45978	07:05	8248
	Měření 4			Měření 5					
<i>Náhodné prohledávání</i>	46600	05:31	6241	48026	05:32	1786			
<i>Hladové prohledávání</i>	39051	05:54	9731	39348	05:38	9784			
<i>Simulované žihání</i>	39177	05:28	2842	38956	05:29	3721			
<i>Zakázané hledání</i>	39377	05:21	9798	39033	05:12	9921			
<i>Genetický algoritmus</i>	42843	07:04	6114	43379	06:53	9862			

Vytížení strojů	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
<i>Náhodné prohledávání</i>	944952	05:27	1	909292	05:29	8590	944952	05:28	1
<i>Hladové prohledávání</i>	771720	05:22	9820	776793	05:24	9993	770894	05:26	9622
<i>Simulované žihání</i>	738559	04:52	6561	770679	05:01	8787	760287	05:00	1369
<i>Zakázané hledání</i>	769487	04:38	5255	771644	04:42	8366	770679	04:28	7363
<i>Genetický algoritmus</i>	828351	06:59	8586	835102	07:01	9134	825972	07:01	7609
	Měření 4			Měření 5					
<i>Náhodné prohledávání</i>	944952	05:28	1	944952	05:27	1			
<i>Hladové prohledávání</i>	771593	05:30	9662	764290	05:28	9858			
<i>Simulované žihání</i>	760287	04:55	9085	771644	04:55	4552			
<i>Zakázané hledání</i>	770679	04:32	5584	772441	04:37	2059			
<i>Genetický algoritmus</i>	846757	07:01	6379	827902	07:01	9014			

Suma všech zpoždění	Měření 1			Měření 2			Měření 3		
	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.	Po	čas	iter.
<i>Náhodné prohledávání</i>	42,5	05:30	4906	42,4	05:29	8892	42,3	05:30	6830
<i>Hladové prohledávání</i>	42,5	05:59	9411	42,4	05:56	9418	42,5	06:03	9506
<i>Simulované žihání</i>	42,4	05:59	3729	42,4	05:58	907	42,3	05:57	6781
<i>Zakázané hledání</i>	42,5	05:41	8377	42,5	06:08	949	42,4	05:35	1877
<i>Genetický algoritmus</i>	42,4	06:47	4475	42,4	07:13	6280	42,3	06:46	9016
	Měření 4			Měření 5					
<i>Náhodné prohledávání</i>	42,4	05:29	7739	42,4	05:30	8791			
<i>Hladové prohledávání</i>	42,5	06:02	9688	42,4	05:56	9993			
<i>Simulované žihání</i>	42,3	05:57	8594	42,4	05:57	9561			
<i>Zakázané hledání</i>	42,5	05:18	5043	42,5	05:47	5632			
<i>Genetický algoritmus</i>	42,4	06:49	8925	42,4	07:29	8987			